

Instituto Superior de Engenharia do Porto



# Sistema de busca e salvamento baseado em múltiplos veículos terrestres

Luís Miguel Sousa Moreira

Tese submetida no âmbito do  
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Eduardo Alexandre Pereira da Silva (Doutor)

Orientador: João Paulo da Costa Baptista (Mestre)

Dezembro de 2009



# Resumo

Esta dissertação visa o desenvolvimento de um sistema de busca e salvamento baseado em múltiplos veículos terrestres, utilizando para tal os veículos LINCE do Laboratório de Sistemas Autónomos. Tendo como principal propósito conferir autonomia aos veículos, foram estudados possíveis cenários de actuação, para determinar as principais funcionalidades requeridas do sistema.

Foram também estudadas metodologias de análise e caracterização de sistemas multi-robóticos, baseadas no estado da arte existente, e foi elaborada a arquitectura conceptual do sistema e dos veículos a desenvolver.

A preparação dos veículos abordou o estudo das possíveis soluções sensoriais e de actuação, e o desenvolvimento de uma arquitectura de hardware capaz de interligar todos os periféricos dos mesmos. Foram adaptados novos sensores e actuadores, e desenvolvidos alguns desses sensores. Para a interligação e manutenção dos mesmos foram ainda desenvolvidos novos periféricos de interface e controlo, e periféricos de gestão de energia. Por fim, foi ainda adaptado um gestor de missões nos veículos, capaz de receber a especificação das mesmas.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)



# Abstract

This dissertation aims to develop a search and rescue system, based on multiple terrestrial vehicles, using LINCE rovers from Autonomous Systems Laboratory. The main purpose of the dissertation is to make changes on these rovers, to give them some autonomy. For that, possible scenarios of action were studied to determine the main functional requirements of the system.

Based on the state of the art of these systems, were also studied methods of analysis and characterization of multi-robot systems, and conceptual architectures of the system and vehicles were designed.

To the vehicles design, some sensor and actuator solutions were analyzed, and a hardware architecture, capable of connecting all devices, was developed. Some sensors and actuators were adapted, and another sensor was developed. It was also developed an interface board to link some devices, and an energy board to power and control them. Finally, it was also adapted in vehicles a mission manager, capable of receiving mission specifications.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

*À Clara, aos meus pais, e a todos aqueles que me apoiaram.*

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

# Conteúdo

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | Âmbito da Dissertação . . . . .                   | 1         |
| 1.2      | Motivação e Enquadramento . . . . .               | 2         |
| 1.3      | Objectivos . . . . .                              | 2         |
| 1.4      | Estrutura da Dissertação . . . . .                | 3         |
| <b>2</b> | <b>Estado da Arte</b>                             | <b>5</b>  |
| 2.1      | Sistema COMET . . . . .                           | 5         |
| 2.2      | Projecto MARS . . . . .                           | 7         |
| 2.3      | Sistema MERLIN . . . . .                          | 8         |
| 2.4      | Plataformas Argo Rover . . . . .                  | 10        |
| 2.5      | Projecto RESCUE . . . . .                         | 11        |
| <b>3</b> | <b>Casos de Estudo</b>                            | <b>13</b> |
| 3.1      | Busca e Salvamento . . . . .                      | 13        |
| 3.1.1    | <i>User Case</i> . . . . .                        | 15        |
| 3.1.2    | Exemplo de Utilização . . . . .                   | 20        |
| 3.2      | Requisitos de Hardware . . . . .                  | 21        |
| <b>4</b> | <b>Sistemas Multi-Robóticos</b>                   | <b>23</b> |
| 4.1      | Características dos SMR . . . . .                 | 24        |
| 4.1.1    | Controlo Centralizado / Descentralizado . . . . . | 24        |
| 4.1.2    | Robôs Homogéneos / Heterogéneos . . . . .         | 25        |
| 4.1.3    | Estruturas de Interação . . . . .                 | 25        |
| 4.1.4    | Modelização de Comportamentos Mútua . . . . .     | 28        |
| 4.2      | Coordenação de Formações . . . . .                | 29        |
| 4.2.1    | Características das Formações . . . . .           | 29        |
| 4.2.2    | Problemas de Coordenação . . . . .                | 31        |
| 4.3      | Tele-operação . . . . .                           | 31        |
| 4.3.1    | Modelos de Controlo . . . . .                     | 32        |
| <b>5</b> | <b>Projecto</b>                                   | <b>35</b> |
| 5.1      | Sistema Multi-Robótico . . . . .                  | 35        |
| 5.2      | Plataforma LINCE . . . . .                        | 37        |
| 5.2.1    | Arquitetura Funcional . . . . .                   | 37        |
| 5.2.2    | Arquitetura de Hardware . . . . .                 | 39        |

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>Sistema Desenvolvido</b>          | <b>41</b> |
| 6.1      | Plataforma LINCE . . . . .           | 41        |
| 6.1.1    | Arquitetura de Hardware . . . . .    | 42        |
| 6.1.2    | Sensores . . . . .                   | 43        |
| 6.1.3    | Actuadores . . . . .                 | 47        |
| 6.1.4    | Comunicações . . . . .               | 48        |
| 6.1.5    | Placa de Gestão de Energia . . . . . | 48        |
| 6.1.6    | STM32 . . . . .                      | 50        |
| 6.1.7    | Pandora . . . . .                    | 52        |
| 6.1.8    | Computador de Bordo . . . . .        | 52        |
| 6.2      | Consola de Operações . . . . .       | 53        |
| 6.3      | Outros Testes e Resultados . . . . . | 54        |
| 6.3.1    | Sensores IR . . . . .                | 54        |
| 6.3.2    | STM32 . . . . .                      | 58        |
| 6.3.3    | Servo-motores Digitais . . . . .     | 59        |
| <b>7</b> | <b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>   | <b>61</b> |
| <b>A</b> | <b>Esquemas e Layouts</b>            | <b>63</b> |
| A.1      | Placa de Gestão de Energia . . . . . | 63        |
| A.2      | STM32 . . . . .                      | 65        |
|          | <b>Referências</b>                   | <b>71</b> |

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Sistema de agentes COMET . . . . .  | 6  |
| 2.2  | Equipa de robôs MARS . . . . .  | 8  |
| 2.3  | Robôs MERLIN . . . . .  | 9  |
| 2.4  | Robô Argo Rover . . . . .   | 10 |
| 2.5  | Robôs do Projecto RESCUE . . . . .  | 11 |
| 3.1  | Cenário de catástrofe . . . . .   | 14 |
| 3.2  | Diagrama de operação das equipas de salvamento . . . . .                      | 16 |
| 3.3  | Planeamento da missão . . . . .   | 20 |
| 4.1  | Topologias de redes de comunicação . . . . .                                  | 27 |
| 5.1  | Sistema multi-robótico projectado . . . . .                                   | 36 |
| 5.2  | Diagrama conceptual de partilha de dados do sistema . . . . .                 | 37 |
| 5.3  | Diagrama funcional da plataforma LINCE . . . . .                              | 38 |
| 5.4  | Arquitectura de hardware projectada . . . . .                                 | 39 |
| 6.1  | Diagrama de comunicações do hardware do LINCE . . . . .                       | 42 |
| 6.2  | Módulo de GPS SUPERSTAR II . . . . .  | 43 |
| 6.3  | a) Hokuyo UBG-04LX-F01. b) Varrimento 2D de um LRF. . . . .                   | 45 |
| 6.4  | Triangulação dos sensores IR . . . . .  | 45 |
| 6.5  | IR <i>range finder</i> . . . . .  | 46 |
| 6.6  | Motor Pittman GM9236S021 . . . . .  | 47 |
| 6.7  | Servo motor HSR-5980SG . . . . .  | 48 |
| 6.8  | Diagrama funcional da placa de gestão de energia . . . . .                    | 49 |
| 6.9  | Placa de gestão de energia . . . . .  | 49 |
| 6.10 | Placa do STM32 . . . . .  | 50 |
| 6.11 | Diagrama funcional do STM32 . . . . .   | 51 |
| 6.12 | Módulo de controlo de motores Pandora . . . . .                               | 52 |
| 6.13 | Aplicação de operação LINCE Mission Control . . . . .                         | 54 |
| 6.14 | Resposta do sensor Sharp GP2D02 . . . . .                                     | 55 |
| 6.15 | Gráfico de calibração 1 . . . . .   | 56 |
| 6.16 | Gráficos de calibração 2 . . . . .  | 56 |
| 6.17 | a) Cenário exterior. b) Resultado do varrimento 2D com 5° de resolução. . .   | 57 |
| 6.18 | a) Cenário interior. b) Resultado do varrimento 2D com 5° de resolução. . .   | 57 |
| 6.19 | a) Cenário exterior. b) Resultado do varrimento 2D com interferência solar. . | 58 |
| 6.20 | Placa de desenvolvimento validada . . . . .                                   | 58 |
| A.1  | <i>Layouts</i> da placa de energia . . . . .                                  | 63 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| A.2 | Esquema eléctrico da placa de energia . . . . .          | 64 |
| A.3 | <i>Layouts</i> da placa do STM32 . . . . .               | 65 |
| A.4 | Esquema eléctrico da placa do STM32 (página 1) . . . . . | 66 |
| A.5 | Esquema eléctrico da placa do STM32 (página 2) . . . . . | 67 |



# Abreviaturas e Símbolos

|       |   |
|-------|---|
| ADC   | <i>Analog-to-Digital Converter</i>                                  |
| AP    | <i>Access Point</i>   |
| CAN   | <i>Controller Area Network</i>                                      |
| CCD   | <i>Charge-Coupled Device</i>  |
| EGNOS | <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>            |
| GGA   | <i>Global Positioning System Fix Data</i>                           |
| GPS   | <i>Global Positioning System</i>                                    |
| GSM   | <i>Global System for Mobile communications</i>                      |
| GSV   | <i>Satellites in view</i>   |
| HMI   | <i>Hitec Multi-protocol Interface</i>                               |
| I2C   | <i>Inter-Integrated Circuit</i>                                     |
| IMU   | <i>Inertial Measurement Unit</i>                                    |
| INS   | <i>Inertial Navigation System</i>                                   |
| IR    | <i>Infrared</i>   |
| ISEP  | Instituto Superior de Engenharia do Porto                           |
| JTAG  | <i>Joint Test Action Group</i>                                      |
| LAN   | <i>Local Area Network</i>   |
| LED   | <i>Light-Emitting Diode</i>   |
| LRF   | <i>Laser Range Finder</i>   |
| LSA   | Laboratório de Sistemas Autónomos                                   |
| PDA   | <i>Personal Digital Assistant</i>                                   |
| RC    | <i>Radio Controlled</i>   |
| RMC   | <i>Recommended Minimum sentence C</i> (Posição, velocidade e tempo) |
| SBAS  | <i>Satellite Based Augmentation System</i>                          |
| SMR   | Sistemas Multi-Robóticos  |
| SPI   | <i>Serial Peripheral Interface</i>                                  |
| UAV   | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>                                      |
| USART | <i>Universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter</i>      |
| USB   | <i>Universal Serial Bus</i>   |
| WAAS  | <i>Wide Area Augmentation System</i>                                |

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

# Capítulo 1

## Introdução

### Conteúdo

|     |                                     |   |
|-----|-------------------------------------|---|
| 1.1 | Âmbito da Dissertação . . . . .     | 1 |
| 1.2 | Motivação e Enquadramento . . . . . | 2 |
| 1.3 | Objectivos . . . . .                | 2 |
| 1.4 | Estrutura da Dissertação . . . . .  | 3 |

### 1.1 Âmbito da Dissertação

A utilização de sistemas de múltiplos veículos autónomos na realização de uma determinada missão, contribui para o aumento da robustez, fiabilidade e capacidade de execução das tarefas.

Estes sistemas podem ser utilizados em diversos tipos de missões, sendo a sua utilização fundamental em missões que colocam o ser humano em risco, como aplicações em ambientes nucleares, missões planetárias, missões militares e de busca e salvamento. Existem ainda outras aplicações que não implicam o risco humano, mas onde a utilização destes sistemas é uma mais valia [1].

São exemplos de algumas aplicações, missões de exploração para a detecção de minas, detecção de incêndios e detecção de substâncias químicas ou nucleares, exploração planetária e exploração para fins de mapeamento, inspecção de canalizações metropolitanas, oleodutos e gasodutos. Missões de limpeza de grandes superfícies e de manutenção de terrenos agrícolas, missões de segurança de um perímetro e escolta de veículos, monitorização ambiental e recuperação de catástrofes.

Os cenários pós catástrofe, de desastres como tremores de terra, tsunamis, enxurradas ou deslizamento de terras, onde o nível de destruição é elevado, dificultam e tornam perigosa a actuação do ser humano. Os perigos devem-se principalmente à possível instabilidade do terreno, à existência de fugas de gás, às explosões e às queda das infraestruturas. Para além do perigo, a destruição dos meios de comunicação locais dificulta o planeamento e a actuação das equipas de salvamento. Nestes casos, a utilização de sistemas robóticos torna-se indispensável.

Nesta dissertação é apresentada uma solução para um sistema de busca e salvamento, pensada principalmente para a utilização em cenários de catástrofe. A solução parte do estudo das metodologias de actuação do sistema na missão, resultando no projecto de uma arquitectura conceptual para o mesmo, e no desenho de soluções de hardware para os veículos que constituem o sistema.

## 1.2 Motivação e Enquadramento

O Laboratório de Sistemas Autónomos, uma unidade de I&D do Instituto Superior de Engenharia do Porto, tem vindo a desenvolver vários projectos com base em veículos autónomos, direccionados para aplicações em ambiente terrestre, aéreo e marítimo.

O projecto LINCE consiste no desenvolvimento de equipas de robôs terrestres para exploração. Os LINCE Rover são os robôs deste projecto, desenvolvidos com capacidade de se movimentarem em diferentes tipos de ambientes, e que permitem a exploração e inspecção em cenários não estruturados com condições variáveis, utilizando para tal técnicas de tele-operação.

Este projecto inclui nos seus objectivos o desenvolvimento das capacidades autónomas dos robôs, tanto numa vertente individual como numa vertente de cooperação em equipa. Consequentemente, foi definido para esta dissertação, o projecto e implementação das alterações necessárias no sistema de veículos, para possibilitar o cumprimento deste objectivo.

## 1.3 Objectivos

As capacidades autónomas dos sistemas robóticos, implicam a utilização de processos elaborados de controlo e navegação, no entanto estes só podem ser executados quando os

robôs possuem capacidades de mapeamento da estrutura do meio em que se movimentam. Essa necessidade surge para que os robôs possam definir as suas sub-tarefas em função dos objectivos fornecidos e da estrutura do meio. Como tal, para a preparação do sistema multi-robótico em causa foram definidos os seguintes objectivos:

- Realizar uma análise dos possíveis cenários de aplicação e das possíveis missões a realizar pelo sistema de robôs LINCE, especificando todas as necessidades que as missões exigem do sistema de robôs, de cada plataforma robótica individual e da equipa de operadores do sistema.
- Desenhar uma arquitectura conceptual para o sistema de busca e salvamento.
- Definir quais os requisitos de hardware dos robôs, para que os mesmos possam cumprir as necessidades das missões analisadas.
- Elaborar um estudo das melhores soluções para os requisitos de hardware definidos.
- Desenhar uma arquitectura que permita a interligação de todos os sensores, actuadores e unidades de processamento dos robôs.
- Aplicar nas plataformas todos os periféricos escolhidos segundo a arquitectura desenhada, e construir as bibliotecas necessárias para o controlo dos mesmos.
- Preparar o sistema computacional do robô para poder receber as especificações das missões a concretizar, definidas pelos operadores.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais seis capítulos. No capítulo 2, está descrito o estado da arte, onde são apresentados alguns projectos de sistemas multi-robóticos existentes, sendo dada ênfase aos projectos que mais se assemelham com o projecto abordado nesta dissertação, descrevendo os temas que mais se relacionam com os objectivos da mesma.

No capítulo 3 são descritas possíveis missões, são evidenciadas as funcionalidades que se esperam do sistema de robôs, e como resultado, os requisitos que essas funcionalidades impõem aos robôs.

No capítulo 4 são descritos alguns conceitos teóricos sobre sistemas multi-robóticos, que fazem referência às diferentes características que estes podem apresentar.

A descrição do projecto conceptual do sistema multi-robótico, assim como o projecto da arquitectura de hardware das plataformas robóticas encontram-se no capítulo 5.

De seguida, no capítulo 6, é descrita a constituição das plataformas robóticas, sendo referenciadas todas as soluções tomadas. É apresentada a arquitectura de ligação dos periféricos integrados, são relatados os aspectos funcionais dos periféricos desenvolvidos e apresentados alguns resultados adicionais.

Por fim, na conclusão (capítulo 7) são apresentados os comentários sobre o trabalho desenvolvido, sobre a contribuição deste trabalho e as perspectivas de trabalho futuro.

São fornecidos também em anexo alguns esquemas eléctricos e *layouts* do principal hardware desenvolvido.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

### Conteúdo

---

|     |                                  |    |
|-----|----------------------------------|----|
| 2.1 | Sistema COMET . . . . .          | 5  |
| 2.2 | Projecto MARS . . . . .          | 7  |
| 2.3 | Sistema MERLIN . . . . .         | 8  |
| 2.4 | Plataformas Argo Rover . . . . . | 10 |
| 2.5 | Projecto RESCUE . . . . .        | 11 |

---

### 2.1 Sistema COMET

O MARHES Laboratory, pertencente à Escola de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Estado de Oklahoma, integra a equipa COMET, com plataformas móveis para o desenvolvimento de redes de múltiplos robôs. Algumas das aplicações que motivam o seu desenvolvimento são a segurança em multi pontos, localização e mapeamento distribuído, transporte cooperativo, monitorização ambiental, busca e salvamento, avaliação de infraestruturas civis, e operações militares [2] [3].

Esta equipa COMET é constituída por dez agentes móveis sensoriais, cada um equipado com um computador embebido, que interliga todos os sensores e actuadores do robô. Todos os veículos têm acesso a uma rede wireless que permite a comunicação da equipa, que a mesma seja controlada por uma LAN ou mesmo pela Internet. A equipa é também

modular, permitindo que sejam utilizados números arbitrários de agentes, adequados a cada missão.



Figura 2.1: Sistema de agentes COMET [2]

Os robôs baseiam-se na plataforma mecânica TXT-1 da Tamiya com tracção e direcção integral, com *encoders* embutidos nas rodas dianteiras para calcular a velocidade de translação e rotação do veículo. O motor de tracção é accionado por um controlador de motores RC e para a direcção são também utilizados servo motores RC sem qualquer tipo de realimentação. A placa *CANBot Control Module* faz o interface entre estes dispositivos e o computador de bordo, através de um barramento CAN. Ligado ao mesmo barramento CAN está também um módulo de GPS e um IMU para a navegação, e módulos com sensores IR para detecção de obstáculos. Ligados directamente ao PC, está um dispositivo de visão estéreo e um *Laser Range Finder*.

Cada veículo corre uma versão do Player, um *software open source* que fornece a interface entre todos os sensores e actuadores do robô, e que permite que vários clientes acessem aos seus recursos ao mesmo tempo. Sem qualquer alteração do Player, este tanto pode correr nas plataformas robóticas, actuando directamente com os periféricos do veículo que interagem com o mundo, como pode correr em simulação em conjunto com o Gazebo, um software que simula um ambiente 3D, e que fornece ao Player os dados simulados da aquisição dos sensores. Juntamente com o Player, os veículos correm uma aplicação que faz o interface entre o barramento de sensores CAN e o Player, actualizando as informações dos sensores a uma taxa de 1KHz.

Através de uma interface gráfica, o operador pode controlar a equipa em vários níveis diferentes. Pode controlar cada veículo individualmente, regulando as suas velocidades e



orientações, ou atribuir *waypoints*, onde o veículo trata neste modo, de calcular as suas trajectórias. Para controlar a equipa completa o operador apenas define uma posição final, ou vários *waypoints* a toda a equipa, escolhendo uma formação rígida ou uma formação de perseguição do líder. Para estas formações a equipa pode utilizar estratégias de coordenação centralizada, em que os algoritmos de controlo de cada veículo, correm na consola de operações, ou estratégias de coordenação descentralizada em que cada veículo processa as suas acções de controlo, sendo a consola utilizada apenas para monitorização do estado dos vários veículos. O conhecimento das posições dos veículos, para poderem respeitar as formações, tanto pode ser adquirido através de algoritmos de reconhecimento com base nos módulos de visão de cada veículo, como ser adquirido através das comunicações.[2]

## 2.2 Projecto MARS

O projecto MARS (*Multiple Autonomous Robots*) desenvolvido no GRASP Laboratory da Universidade da Pensilvânia, em Filadélfia, EUA, é um projecto já concluído que teve como principais objectivos desenvolver ferramentas para equipas de múltiplos robôs autónomos para actuação em ambientes desconhecidos e não estruturados, realizando missões de reconhecimento do terreno, vigilância, aquisição de alvos, remoção de explosivos, busca e salvamento, e tarefas de transporte cooperativo de objectos. O seu desenvolvimento teve também como alvo, permitir que as equipas construídas fossem capazes de realizar operações autonomamente com comportamentos reactivos e deliberativos, que fossem reprogramadas pelo operador em tempo real, que aprendessem e se adaptassem a ambientes dinâmicos e não estruturados, assim como a novas tarefas, fornecendo sempre garantias de desempenho. As arquitecturas a propor teriam de garantir o funcionamento com número ilimitados de robôs, e que apenas um operador pudesse controlar toda a equipa [4].

Durante o desenvolvimento de todas as ferramentas do projecto, foram utilizadas três plataformas diferentes, os Clodbuster I, II e III. As duas primeiras utilizam a plataforma mecânica Clodbuster da Tamiya Inc. e a terceira a plataforma TXT-1 também da Tamiya Inc. Como periféricos sensoriais as duas primeiras plataformas utilizam apenas uma câmara de vídeo omnidireccional. No Clodbuster I o vídeo é transmitido em RF para uma estação de controlo, que processa os dados dos robôs e actua sobre os mesmos também por módulos RF, utilizando assim o sistema um controlo centralizado. Na evolução para



Figura 2.2: Equipa de robôs MARS [4]

o Clodbuster II foi introduzido um computador com um processador PIII a 850MHz e 128MB de RAM, e um periférico de comunicação wireless 802.11B, podendo tornar assim o sistema descentralizado. A ultima versão desta plataforma, o Clodbuster III, além de pequenas melhorias no sistema computacional, integra duas câmaras de vídeo, colocadas nas direcções frontal e traseira do veículo, e 12 sensores de distância IR colocados três em cada canto do veículo. Um módulo baseado numa FPGA controla todos os sensores IR, recebe os seus dados e faz a interface com o computador através de uma comunicação RS-232. Este mesmo módulo integra ainda um acelerómetro de dois eixos, e faz também a interface entre o computador e os servo-motores do veículo [5] [6] [7] [8].

## 2.3 Sistema MERLIN

Os veículos MERLIN (*Mobile Experimental Rover for Locomotion and Intelligent Navigation*) são pequenos robôs *outdoor* tele-operados preparados para operações robustas em ambientes climatéricos instáveis. Os seus criadores da Universidade de Wurzburg, Alemanha desenvolvem as plataformas para a utilização em missões de busca e salvamento, dando suporte a emergências, missões de segurança e vigilância, especialmente em zonas de perigo para o ser humano, e para inspecção de canalizações [9]. Apostam em plataformas de pequeno porte, para aceder a zonas mais apertadas, podendo estas com os avanços tecnológicos suportar sensores sofisticados, como nas plataformas de grande porte.

O sistema MERLIN completo de um dos veículos analisados em [10] é constituído pelo veículo, pela estação de controlo, pelos dispositivos de comunicação rádio e pelos periféricos que podem ser adicionados ao veículo. Estes periféricos como braços robóticos,



Figura 2.3: Robôs MERLIN [10]

dispositivos de vigilância ou mecanismos de detecção de minas, são modulares, permitindo que sejam utilizados apenas para missões específicas. O controlo dos mesmos é feito através de um barramento CAN, que possibilita a sua rápida integração no sistema do veículo. O periférico standard integrado é um braço robótico utilizado como mastro para elevar duas câmaras de vídeo, uma com uma grande abertura para possibilitar a identificação dos vários obstáculos e outra com capacidades de zoom para adquirir maior detalhe. A estação de controlo é constituída por um computador portátil com um *joystick*, pelos dispositivos de comunicação rádio e por um carregador para os *packs* de baterias dos robôs.

O veículo inclui um motor de tracção de alto binário de 1600 Watt e, como dispositivos sensoriais, integra 4 sensores de ultra-sons para detecção de obstáculos colocados na frente e traseira do veículo, 2 sensores de distância IR também para detecção de obstáculos colocados nas laterais do veículo, um *encoder* incremental adaptado no eixo do motor de tracção, um sensor de corrente também para o motor de tracção, duas câmaras de vídeo na frente e na traseira do veículo, um giroscópio, 2 inclinómetros e um sensor de GPS. Todo o processamento de dados dos sensores realizado no robô é feito por um dispositivo baseado num microprocessador.

O sistema de comunicações está dividido em duas componentes, uma de envio de dados da consola de operações para o veículo, que transporta os comandos do operador, e outra de recepção de dados na direcção oposta, que transporta o vídeo, áudio e dados dos sensores. As duas componentes utilizam transmissores de rádio separados e ambas funcionam com distâncias de 500 a 1000 metros, com atrasos na transmissão de vídeo de cerca de 0.5 segundos.

Em modo de tele-operação, com o tratamento de dados efectuado pelo robô, este

fornece ao operador um suporte activo, isto é, o veículo analisa as características do ambiente, e caso os comandos do operador ponham em causa a sua estabilidade física ou caso se preveja uma colisão, o veículo toma o controlo para não permitir que tal se suceda. No modo autónomo, o operador apenas tem de definir *waypoints* para o seu percurso, e no caso do perda de comunicações o veículo é também capaz de voltar a um posição de comunicações garantidas.

É conhecido que vários veículos MERLIN são utilizados em equipa, no entanto não é conhecido se existe qualquer interactividade centralizada ou descentralizada entre os vários robôs.

## 2.4 Plataformas Argo Rover

O Instituto de Estudos Aeroespaciais da Universidade de Toronto no Canadá, possui um equipa de dez robôs Argo Rover, criados principalmente para o desenvolvimento de estratégias de exploração da superfície de Marte com recurso a múltiplos robôs. Utilizam actualmente o MarsDome, uma estrutura criada para simular o ambiente de Marte, e esperam em 2011 aplicar todas as estratégias de exploração multi robótica desenvolvidas, na superfície de Marte [11] [12].



Figura 2.4: Robô Argo Rover [11]

Estes veículos utilizam a base mecânica TXT1 da Tamiya Inc. e têm um computador de bordo com um processador a 700 MHz, que utiliza Linux para fazer o processamento de todos os dados. A interface entre o computador e todos os sensores e actuadores dos veículos é feita através de um microprocessador de 16 bit a 20 MHz. Cada veículo está equipado com um dispositivo *wireless Ethernet*, utilizado para desenvolvimento remoto de

software, operação e potencialmente para comunicação directa entre veículos. As baterias estão colocadas no interior das rodas, de forma a baixar o centro de gravidade dos veículos para melhorar a estabilidade, desocupando assim espaço que pode ser utilizado para outros periféricos. Para a direcção dianteira e traseira são utilizados servo motores genéricos de RC e para tracção dos veículos são utilizados motores com caixa redutora com uma relação 6:1, garantindo aos veículos uma velocidade de 0,5 m/s. Cada veículo contém um *encoder* incremental em cada roda para possibilitar a navegação odométrica, um sistema de visão *stereo* com cinco graus de liberdade, oito *sonar range finders*, um magnetómetro, um inclinómetro de dois eixos e suspensão activa com quatro graus de liberdade. Estão ainda preparados para a integração de radares, um braço robótico, uma broca de perfuração e câmaras laser [11] [12].

## 2.5 Projecto RESCUE

O Projecto RESCUE - *Cooperative Navigation for Rescue Robots*, é um projecto desenvolvido pelos grupos de investigação de Sistemas Inteligentes, Visão Computacional e Robótica Móvel, do Instituto de Sistemas e Robótica, do Instituto Superior Técnico em Lisboa. Este projecto tem como principal objectivo, desenvolver soluções integradas para o desenho de equipas cooperativas de robôs, para operação em ambientes *outdoor* perigosos, nomeadamente cenários de busca e salvamento, combate de incêndios e detecção de minas, cenários de monitorização e vigilância ambiental, e cenários de produção agrícola em massa. Para tal, o projecto visa desenvolver soluções para mapeamento do cenário, navegação cooperativa de multi-robôs, e coordenação e gestão de tarefas multi-robóticas [13] [14].



(a)



(b)

Figura 2.5: Robôs do Projecto RESCUE [14]

Numa primeira fase, desenvolvem as soluções para um cenário de busca e salvamento em que utilizam dois robôs, um dirigível e um robô terrestre ATRV-JR. O dirigível é utilizado para criar mapas topológicos do cenário, utilizando algoritmos de visão, que armazenam informações da possível destruição de cada zona, presença de vítimas e zonas que impeçam a passagem dos robôs terrestres, sendo estes utilizados para gerar as trajectórias para os mesmos. Poderá também servir de plataforma de comunicações, entre a estação de operações e o veículo terrestre. A navegação do dirigível é baseada em visão, ao contrário do robô terrestre que utiliza inúmeros sensores, entre os quais, GPS, bússola, odometria, um *laser scanner*, 17 *sonars* e sistemas de navegação baseados numa câmara de vídeo com *pan&tilt* integrado e sensores inerciais como giroscópios e acelerómetros. O GPS devolve informações absolutas de posição, as quais são alvo de fusão com dados relativos dos acelerómetros e da odometria. A bússola devolve também informações de orientação absolutas, que são fundidas com dados relativos do giroscópio.

O controlo da equipa é realizado através de software cuja arquitectura permite um controlo distribuído, com diferentes *threads* para aquisição e processamento de dados dos sensores, para as comunicações e para a execução e alteração de comportamentos. Os dados sensoriais originais e já processados são arquivados em memória partilhada, sendo alguns dos mesmos utilizados apenas pelo robô em causa, e outros enviados para toda a equipa. A arquitectura funcional do sistema inclui o planeamento de tarefas, coordenação de tarefas e gestão de comportamentos [13] [14].

## Capítulo 3

# Casos de Estudo

### Conteúdo

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Busca e Salvamento . . . . .</b>     | <b>13</b> |
| 3.1.1      | <i>User Case</i> . . . . .              | 15        |
| 3.1.2      | Exemplo de Utilização . . . . .         | 20        |
| <b>3.2</b> | <b>Requisitos de Hardware . . . . .</b> | <b>21</b> |

### 3.1 Busca e Salvamento

Os cenários pós catástrofe de desastres como tremores de terra, *tsunamis*, enxurradas ou deslizamento de terras, onde o nível de destruição é elevado, dificultam e tornam perigosa a actuação do ser humano. Os perigos devem-se principalmente à possível instabilidade do terreno, à existência de fugas de gás, às explosões e às queda das infraestruturas. Para além do perigo, a destruição dos meios de comunicação locais dificulta o planeamento e a actuação das equipas de salvamento.

A Figura 3.1 ilustra um cenário real de catástrofe numa ilha, provocado por sucessivos tremores de terra e um *tsunami*, que destruíram casas e pontes, e provocaram incêndios no local. Estes cenários são propícios à utilização de ferramentas avançadas auxiliares da missão de busca e salvamento, que permitem o aumento da eficácia destas acções sem pôr em risco vidas humanas.

Um dos principais problemas que se colocam frequentemente neste tipo de cenário é a rápida localização das vítimas, e a chegada de uma primeira ajuda àqueles que ainda se encontram com vida, sem colocar também em risco a vida dos socorristas (basta pensar





Figura 3.1: Cenário de catástrofe

que nos dois dias subsequentes ao terramoto que ocorreu na China em 2008 morreram mais de 200 pessoas em operações de auxílio [15]).

Neste capítulo será analisado e especificado o uso de uma ferramenta auxiliar de busca e salvamento baseada numa equipa de robôs móveis. Esta equipa será constituída por dois segmentos, o aéreo e o terrestre. A ferramenta a ser projectada irá ser equacionada para utilização nos seguintes quatro diferentes tipos de missões:

- **Risk Assessment** - Esta missão consiste em mapear os diversos riscos existentes no terreno. Os veículos têm como objectivo final a construção de mapas de imagens georreferenciadas, mapas digitais da estrutura do terreno e mapas de localização de substâncias químicas que poderão ser tóxicas ou explosivas.
- **Resgate** - Onde os veículos pesquisam o terreno para criar mapas de localização das vítimas para informação das equipas de salvamento, e onde, embora limitado, os operadores poderão dar algum apoio através da interacção com as vítimas utilizando os robôs para tal.
- **Mula** - Onde se dá apoio às vítimas enquanto não é possível o resgate. Os robôs são utilizados apenas como uma “mula” para transporte de alimentos, medicamentos e



outros bens vitais, quando as vítimas se encontram presas em locais inacessíveis aos humanos.

- **Infra-estrutura de Comunicação** - Onde os veículos são utilizados apenas para fornecer comunicações às equipas de salvamento, nos casos de destruição dos meios de comunicação locais.

Como o objectivo desta dissertação é o desenvolvimento do segmento terrestre, será focada principalmente esta equipa de robôs, sem contudo deixar de referir sempre que necessário os robôs do segmento aéreo.

### 3.1.1 *User Case*

Juntamente com as equipas de salvamento de humanos é utilizado um sistema de robôs que apoia a equipa na detecção e resgate de vítimas. A equipa é constituída por robôs terrestres, com sensores de GPS, *Laser Range Finder* (e outros sensores para detecção da estrutura do terreno e obstáculos), sensores de substâncias químicas, sistema inercial, câmaras termográficas e de vídeo totalmente rotativas (para a supervisão, tele-operação e detecção de vítimas), e microfone e altifalantes para possível interacção com as vítimas. Possuem uma plataforma mecânica capaz de se deslocar nos terrenos mais acidentados. Especificamente para missões de mula, os veículos estão adaptados para o transporte dos bens vitais. Os operadores planificam a missão, atribuem as tarefas aos veículos, supervisionam e tele-operam quando necessário. A equipa é ainda apoiada por um robô aéreo *quadrotor*, controlado por outra equipa de operação, que percorre o cenário criando mapas fotográficos com informação das zonas de maior probabilidade de existência de vítimas. Toda a equipa de salvamento é orientada por um agente que coordena as diferentes operações realizadas pelas equipas humanas e robóticas.

Nestas missões é importante que exista uma rede de comunicações entre todos os veículos e a estação de operação. No caso de uma área reduzida, é provável que a estação de operação consiga fornecer a rede a todos os veículos, no entanto em maiores áreas será necessário que os veículos sirvam também de infraestrutura de comunicação, não só para as comunicações entre a equipa, mas também para disponibilizar comunicações às restantes equipas de salvamento.

A análise dos métodos de actuação das equipas de salvamento, bem como dos comportamentos esperados pela equipa de robôs, será aqui dividida em cinco fases: no *Setup* são

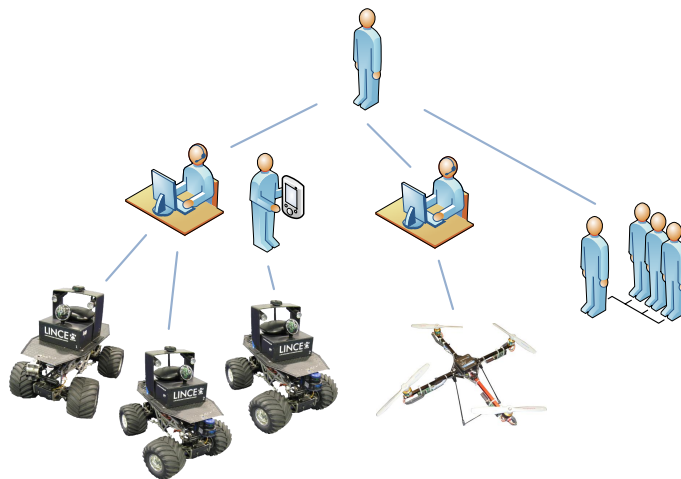


Figura 3.2: Diagrama de operação das equipas de salvamento

abordadas as inicializações da missão; no *Briefing* é realizado o planeamento da missão; no *Survey* analisam-se os comportamentos durante a pesquisa; no *Debriefing* relatam-se e analisam-se os resultados da missão; no *Close* finaliza-se a missão.

### Setup

- As equipas de operação deslocam-se até ao local em veículos todo terreno, veículos aéreos ou mesmo a pé, carregando o material de operação em mochilas. O material terá de ser portátil, e minimamente robusto.
- Os operadores montam no local uma estação de supervisão e controlo dos veículos, no mínimo com uma consola de operação, que deverá conter um mapa do local com informações das posições globais antes da ocorrência da catástrofe, com um *Access Point* que fornecerá uma rede *wireless* e com carregadores de baterias para os veículos.
- A localização da estação terá de ser estrategicamente pensada, de forma a disponibilizar um bom raio de comunicações, permitindo uma boa visão sobre o cenário e mantendo sempre a segurança dos operadores.
- As consolas de operação dos veículos têm de disponibilizar o mapa da zona de operação e outros mapas digitais criados pelos veículos, disponibilizar periféricos

que permitam os diferentes métodos de controlo dos veículos, e permitir que os operadores tenham a percepção real do ambiente em que os veículos se encontram. A localização da estação de operação tem de ser assinalada, para informação do robôs.

- Podem ser utilizadas diferentes consolas para a operação de cada veículo ou apenas um consola para a operação de todo o sistema, sendo neste caso dificultada a teleoperação directa de cada veículo. As consolas poderão ter como base computadores portáteis, PDA's, ou outros sistemas computacionais.
- A equipa deverá ser constituída por um número de robôs de acordo com a área a analisar e com o número de operadores envolvidos. Quanto maior for a equipa de robôs mais rapidamente se concluirá a missão, no entanto maior será também a exigência de coordenação na operação dos veículos.
- Os veículos serão colocados na zona da estação de operação, onde os operadores os ligam. Estes inicializam automaticamente e aguardam por novas instruções.
- Os operadores verificam as comunicações com os robôs, o estado dos seus sensores e baterias, e se possuem anomalias. Detectadas anomalias, é guardada informação sobre as mesmas na consola. Assim que concluídas todas as verificações, é terminada a fase de *setup* da missão.

### **Briefing**

- A equipa de operação poderá receber do sistema aéreo o mapa actualizado, que indica as zonas onde existe maior probabilidade da existência de vítimas.
- Os operadores analisam o mapa e definem qual o tipo de estratégia de pesquisa a utilizar em cada zona do cenário.
- Como tarefas, podem ser definidas áreas de pesquisa para cada veículo, onde estes irão pesquisar autonomamente, um ponto que o veículo terá de atingir, ou uma trajectória específica a cumprir.
- Os operadores podem definir nas consolas de operação as áreas onde se terá de teleoperar os veículos, devido à complexidade dos terrenos e possível inexistência de informação de GPS, como por exemplo no interior de edifícios.

- Quando atribuída uma área de pesquisa, recorrendo a um planeador terá de ser calculada a melhor trajectória a realizar de forma a cobrir a maior área possível. O planeador poderá ser o próprio veículo ou o operador.
- Os robôs iniciam a sua pesquisa apenas quando o operador definir o início da tarefa na consola de operação.
- Quando localizados em zonas definidas para tele-operação, os veículos aguardam pela intervenção do operador.
- Assim que terminadas as tarefas pelos veículos, os operadores atribuem novas tarefas até que se cubra toda a área do cenário.
- A qualquer momento os operadores podem abortar as tarefas ou mesmo a missão.

### *Survey*

- Após a atribuição das tarefas aos veículos, os operadores declaram início da missão nas consolas de operação. Os veículos iniciam as suas pesquisas.
- Os veículos disponibilizam continuamente aos operadores dados das suas câmaras de vídeo e outros sensores, informações sobre o estado das suas baterias, anomalias, e sobre qual a tarefa que estão a executar (calcular trajectória, seguir trajectória, contornar obstáculo, etc).
- Sempre que ocorra uma anomalia, o estado das baterias seja insuficiente, ou os robôs se deparem com problemas que não conseguem ultrapassar sozinhos (obstáculos, instabilidade física ou perda de posição/orientação), é emitido um alarme. Nas consolas de operação estes alarmes são representados com avisos sonoros e visuais. Os veículos aguardam por novas instruções.
- Caso o nível das baterias dos veículos seja insuficiente para concluir a tarefa actual e regressar à estação de operação, os veículos podem, a meio da tarefa, regressar para se auto-recarregar, pedindo autorização aos operadores. O operador deve ter em conta, na sua decisão de autorização, se as comunicações dos restantes veículos não serão afectadas com a retirada do robô.

- Os veículos têm de ser capazes de mapear o terreno, detectar vítimas e detectar substâncias químicas, e em equipa criar um mapa das possíveis localizações para informação das equipas de salvamento.
- Sempre que um dos veículos detecta ou suspeita da possível existência de uma vítima, avisa o operador, fornece informações audiovisuais da vítima e aguarda novas instruções. O operador analisa a informação recebida do robô, faz os possíveis para o apoio à vítima, informa as equipas de salvamento e define novas tarefas ao robô.
- A qualquer momento da missão, o operador pode desejar tele-operar qualquer um dos veículos da equipa, tendo assim estes de suportar a comutação autónomo/tele-operado.
- A qualquer momento os veículos perdem comunicações. Neste momento podem tentar voltar para a última localização alcançada, onde é garantida a existência de comunicações, ou continuar a executar a tarefa, transmitindo mais tarde os dados adquiridos. Na consola de operações é apresentado um aviso de alerta.
- Os veículos terminam a tarefa atribuída. Avisam o operador, e aguardam novas ordens. O operador decide se define uma nova área, trajectória ou ponto de pesquisa, ou se dá por terminada a missão.

### *Debriefing*

- Os mapas criados durante a pesquisa, pela equipa multi-robótica, são guardados, analisados e disponibilizados às equipas de salvamento.
- Caso seja detectada alguma falha na criação dos mapas, os operadores decidem se será necessária uma nova pesquisa.
- Após a finalização da pesquisa em toda a área do cenário, os veículos regressam à estação de operação.

### *Close*

- Dada como terminada a missão pelos operadores, é reavaliado o estado dos veículos, e anotados possíveis danos.

- Os veículos são desligados, é desmontada toda a estação de operação e guardado todo material, para o regresso.

### 3.1.2 Exemplo de Utilização

Iniciando uma missão de resgate no local ilustrado na Figura 3.3, uma equipa de dois operadores chega ao local e monta a estação de operação no ponto E. A estação é constituída por duas consolas de operação, que possibilitam o controlo dos veículos terrestres de pesquisa 1, 2 e 3. O veículo 3 integra um braço mecânico com uma câmara de vídeo na extremidade que possibilita a busca em locais mais retirados e deteriorados [16].

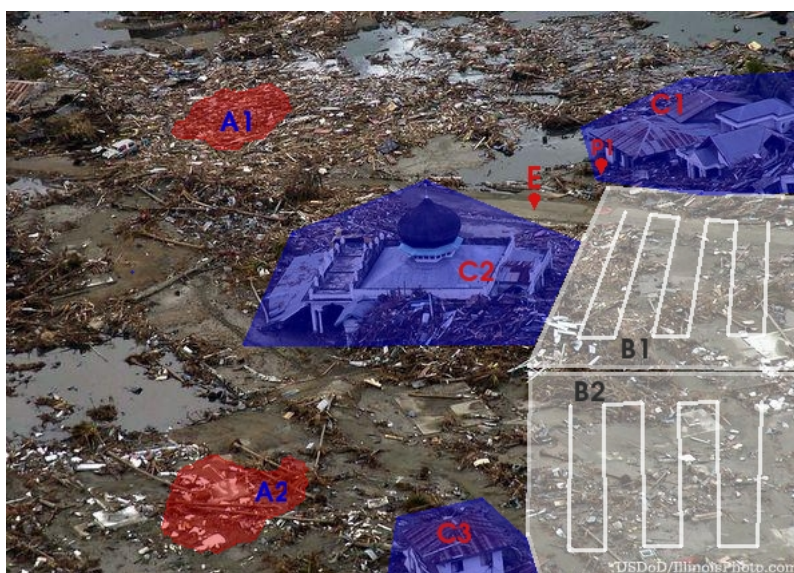


Figura 3.3: Planeamento da missão

Juntamente com a equipa de veículos terrestres, operam equipas de salvamento humanas, e uma equipa com veículos aéreos. Esta equipa fornece às restantes mapas actualizados do cenário destruído, onde estão já representadas as zonas A1 e A2 de maior probabilidade de existência de vítimas humanas com vida. Assim que verificada a integridade das infraestruturas dessas zonas, para que não exista perigo para os humanos, os mesmos são enviados para essas zonas. Durante a sua pesquisa, são definidas para os veículos terrestres outras tarefas.

Os operadores definem nas consolas de operação as zonas C1, C2 e C3, onde se terá de tele-operar os veículos, devido à complexidade dos terrenos e possível inexistência de informação de GPS. Aos dois robôs homogêneos são atribuídas as zonas B1 e B2, onde

estes realizarão as suas pesquisas autonomamente, e ao terceiro é dada a ordem para se deslocar até ao ponto P1 onde irá ser tele-operado directamente para busca dentro das casas.

Assim que os operadores definem o início da tarefa na consola, os robôs 1 e 2 deslocam-se para os pontos iniciais das trajectórias definidas, determinadas para a maior cobertura possível das áreas definidas (ilustradas nas zonas B1 e B2). Quando terminadas as tarefas por estes veículos, os operadores atribuirão novas zonas de pesquisa até que se cubra toda a área do cenário.

Também quando os operadores definem o início da tarefa, o robô 3 desloca-se para o ponto P1 definido, onde irá ser tele-operado directamente dentro das instalações da zona C1, assim como nas zonas C2 e C3. Sempre que o tele-operador termina a pesquisa de uma das zonas, é atribuído um novo ponto para onde o veículo se deslocará autonomamente, e nesse ponto voltará a ser tele-operado directamente.

## 3.2 Requisitos de Hardware

No desenvolvimento das secções anteriores não são apenas definidas as funcionalidades esperadas pelo sistema robótico terrestre, mas sim as funcionalidades e metodologias de actuação esperadas por toda a equipa de salvamento, constituída pelos robôs, operadores e dispositivos de controlo. No entanto, sendo um dos objectivos deste trabalho o desenvolvimento do sistema robótico terrestre, adquiriu-se da análise realizada os seguintes requisitos de hardware para as plataformas robóticas, que tornam possíveis as funcionalidades especificadas para as mesmas.

- Actuadores de locomoção e direcção.
- Câmara de vídeo para tele-operação.
- Sensores para detecção de obstáculos e mapeamento do terreno.
- Sensores de orientação e atitude do veículo.
- Sensores de posição absoluta e relativa.
- Sensores que possibilitem o registo do percurso percorrido.
- Sensores de velocidade e binário.

- Sensores de detecção dos diversos alvos possíveis.
- Sistema de gestão de energia que possibilite o diagnóstico e manutenção das baterias, e que permita a utilização de energias renováveis.
- Dispositivo mecânico que permita o carregamento autónomo das baterias numa doca.
- Dispositivos para detecção de anomalias.
- Dispositivo de comunicações sem fios Mesh.
- Preparação para diferentes condições de luminosidade e climatéricas.
- Capacidade de adaptação de novos sensores adequados a missões específicas.



## Capítulo 4

# Sistemas Multi-Robóticos

### Conteúdo

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>Características dos SMR . . . . .</b>          | <b>24</b> |
| 4.1.1      | Controlo Centralizado / Descentralizado . . . . . | 24        |
| 4.1.2      | Robôs Homogéneos / Heterogéneos . . . . .         | 25        |
| 4.1.3      | Estruturas de Interacção . . . . .                | 25        |
| 4.1.4      | Modelização de Comportamentos Mútua . . . . .     | 28        |
| <b>4.2</b> | <b>Coordenação de Formações . . . . .</b>         | <b>29</b> |
| 4.2.1      | Características das Formações . . . . .           | 29        |
| 4.2.2      | Problemas de Coordenação . . . . .                | 31        |
| <b>4.3</b> | <b>Tele-operação . . . . .</b>                    | <b>31</b> |
| 4.3.1      | Modelos de Controlo . . . . .                     | 32        |

---

Os Sistemas Multi-Robóticos (SMR) são compostos por múltiplos robôs com capacidades autónomas e, ao mesmo tempo, com capacidades de interacção entre os vários robôs do sistema. Para a satisfação do sistema estes robôs apresentam duas características principais: serem capazes de agir de forma autónoma, tomando decisões que levam à concretização dos seus objectivos, e serem capazes de interagir com outros robôs do sistema, garantindo funcionalidades de coordenação, cooperação, competição e/ou negociação, que levam à concretização dos objectivos de todo o sistema [17].

A utilização destes sistemas, em relação a um único robô, é vantajoso pelas seguintes razões: fornece uma maior robustez e fiabilidade, pois no caso de avaria de um robô, o sistema poderá continuar a realizar a sua tarefa; fornece uma maior capacidade de análise do ambiente com a utilização de diferentes tipos de sensores nos vários robôs; poderá permitir uma redução de custos, pela utilização de apenas um sistema para várias tarefas diferentes; leva ao desenvolvimento de novas tecnologias, pois estes sistemas utilizam processos de maior complexidade.

Os principais problemas inerentes ao desenvolvimento destes sistemas, consistem na atribuição das diferentes tarefas aos robôs (*Task Allocation*), na coordenação das movimentações dos robôs (*Motion Coordination*), na capacidade de partilha de mapas e outros dispositivos de navegação entre os robôs (*Cooperative Navigation*), e na capacidade de detecção de obstáculos e desvio de trajectória dos mesmos (*Sense & Avoid*).

## 4.1 Características dos SMR

As arquitecturas de controlo dos Sistemas Multi-Robóticos podem ser caracterizadas pela sua actividade centralizada / descentralizada, pela integração de robôs homogéneos ou heterogéneos, pelas estruturas de comunicação utilizadas, e pela capacidade que cada robô tem de modelizar os comportamentos dos parceiros [18]. Estas são importantes características a analisar durante a especificação de um sistema multi-robótico, para realizar uma determinada função.

### 4.1.1 Controlo Centralizado / Descentralizado

Segundo [18], os sistemas multi-robóticos podem ser divididos em sistemas:

- Centralizados;
- Descentralizados;
  - Distribuídos;
  - Hierárquicos.

Os sistemas centralizados são aqueles em que apenas um dos agentes tem capacidade de controlo, definindo este os objectivos de todos os restantes agentes. Este tipo de sistemas apresenta normalmente, uma sobrecarga sobre o agente que controla o sistema, e perde

também a sua robustez, pois no caso de uma falha no agente central, todos os robôs ficam inoperacionais. Porém, tem a vantagem de produzir planos de actuação mais precisos do que um sistema descentralizado [19].

Os sistemas descentralizados e distribuídos são aqueles em que todos os agentes possuem as mesmas capacidades de controlo, e os sistemas descentralizados e hierárquicos são aqueles onde todos possuem capacidades de controlo, mas com uma hierarquia entre os agentes. Este sistemas têm um maior nível de complexidade, mas, além da maior robustez e fiabilidade já referida, são também facilmente escaláveis [1] [18].

#### 4.1.2 Robôs Homogéneos / Heterogéneos

Um grupo de robôs é homogéneo, quando todos os robôs possuem as mesmas capacidades, e heterogéneo caso possuam capacidades diferentes. Um sistema de robôs heterogéneo é mais complexo, pois a atribuição de tarefas a cada robô irá depender das suas capacidades, para assegurar uma melhor performance. Esta atribuição exige que os robôs consigam modelizar os membros da equipa, no caso da utilização de uma arquitectura distribuída.

A cobertura de tarefas (*task coverage*) representa, segundo [20], a capacidade que um determinado sistema multi-robótico tem para executar uma determinada tarefa, e esta cobertura é índice da exigência de cooperação de um sistema. Quando a cobertura de uma tarefa é grande, as tarefas podem ser executadas com pouca cooperação da equipa, sendo no caso contrário necessária mais cooperação. Isto indica que, quanto mais homogéneo for um sistema multi-robótico, maior será a necessidade de cooperação para executar uma tarefa, e quanto mais heterogéneo, menor será a cooperação. No caso extremo de heterogeneidade apenas um agente poderá realizar uma determinada tarefa, não existindo cooperação alguma com os outros agentes. Os sistemas homogéneos apresentam ainda uma maior tolerância a falhas, pelo facto dos robôs não serem especializados [18].

#### 4.1.3 Estruturas de Interação

Normalmente, por abstracção inconsciente, pensa-se na interação entre robôs como uma comunicação protocolar nos dois sentidos. No entanto, segundo [18] e [20], a interação entre robôs não exige uma comunicação. Os mesmos podem interagir através do meio (*Environment interaction*), através das capacidades de detecção (*Sensorized interaction*), e através de comunicação (*Communication interaction*).

- *Environment interaction* é o modo de interacção mais simples e limitado, pois não existe comunicação explícita, interagindo apenas, todos os robôs com o mesmo meio. Muitos referem estes sistemas como sendo de “cooperação sem comunicação”.
- *Sensorized interaction* é o modo em que a interacção ocorre quando os robôs se conseguem detectar e identificar através dos sensores, também sem a existência de comunicação explícita. Muitos dos sistemas que utilizam este tipo de interacção, utilizam sensores de visão para detectar as posições dos robôs do sistema, de forma a executar formações e calcular as suas rotas.
- *Communication interaction* é o tipo de interacção em que os robôs utilizam comunicação explícita, enviando mensagens directamente entre eles ou através de *broadcast*, e utilizando diversas topologias de comunicação.

### Arquitecturas de Comunicação

Segundo [17], na existência de uma comunicação explícita entre robôs, esta pode ter uma arquitectura directa ou assistida.

- Nas comunicações directas os robôs tratam da sua própria comunicação sem intervenção de qualquer outro agente, partilhando as especificações que permitem a comunicação. Um dos principais problemas deste tipo de comunicações consiste na inexistência de um elemento que coordene a comunicação, para evitar conflitos na tentativa de transmissão de dados simultânea.
- Nas comunicações assistidas os robôs recorrem a um elemento intermediário, que facilita a comunicação. Este elemento recebe as mensagens dos robôs, e irá reencaminha-las para o destino, fazendo assim a coordenação de envio das mensagens, para evitar os conflitos referidos. Deste modo, é diminuída também a complexidade exigida aos robôs para realizar as comunicações, pois estes não necessitam de armazenar informações detalhadas sobre os outros robôs. Este tipo de comunicações pode introduzir no sistema uma certa centralização e estrangulamento das comunicações no agente intermediário, e no caso de falha deste agente, todas as comunicações deixam de funcionar.

De um ponto de vista do nível de implementação, as comunicações podem ser realizadas de duas formas:

- Todos os dados são transmitidos para uma memória partilhada (*Blackboard*), onde os robôs acedem para descarregar os mesmos.
- Passagem de mensagens entre os robôs.

A passagem de mensagens é o modo mais utilizado, pois a rapidez e privacidade com que as mensagens são transmitidas garantem uma maior eficácia. A utilização de memória partilhada é normalmente de mais difícil implementação, pois exige metodologias adicionais para a sincronização dos robôs, especificamente no controlo de acesso à informação, mas por exemplo no caso de partilha de mapas digitais entre os robôs, tem a vantagem de todos poderem construir o mesmo mapa. Utilizando a passagem de mensagens, é necessário considerar a arquitectura de comunicação definida. No caso duma arquitectura de comunicação directa, é necessário assegurar que os robôs podem receber mensagens constantemente e inversamente prever a possibilidade de uma mensagem enviada não ser recebida pelo robô de destino. A arquitectura de comunicação assistida pode já resolver este problema, caso o elemento intermediário esteja munido de capacidade de manter as mensagens, e reenviá-las até que o destinatário as receba.

### Topologias de Comunicação

No caso da utilização de redes de comunicação, estas podem seguir diferentes topologias. Uma topologia define a forma de uma rede e as relações existentes entre os membros da mesma. A Figura 4.1 ilustra algumas das variadas topologias existentes, tanto para as ligações de dados física como lógica, sendo as mais comuns e importantes para sistemas multi-robóticos:

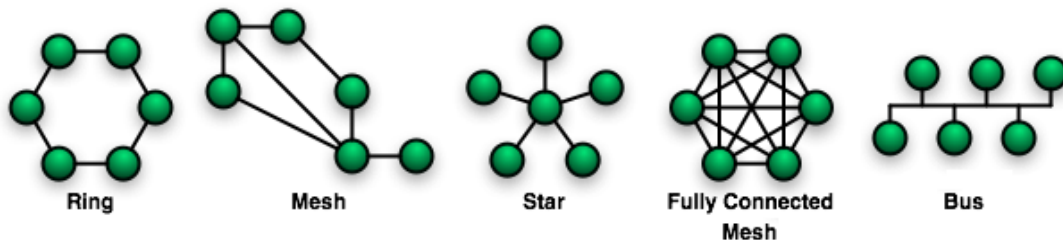


Figura 4.1: Topologias de redes de comunicação

- **Estrela.** Nesta topologia cada mensagem transmitida entre dois membros passa sempre por um elemento coordenador (*hub/switch*), que encaminha as mensagens

para o destino e controla quem pode transmitir. Estas redes apresentam vulnerabilidades, pois no caso da ligação de um dos membros com o elemento coordenador se quebrar, este deixa de poder comunicar com qualquer membro da rede. No caso de falha do elemento coordenador, toda a rede deixará de funcionar [21].

Na implementação de uma rede *wireless* com este tipo de topologia num sistema multi-robótico, todos os robôs têm de ter conexão directa com o *access point* coordenador, limitando o sistema a navegar a distâncias curtas da estação de controlo.

- **Mesh.** Numa topologia *mesh* todos os membros possuem ligações entre eles, quando possível, e as mensagens podem ser transmitidas por diversos caminhos. Considerando quatro elementos A,B,C e D, numa transmissão de A para D, a mensagem pode percorrer qualquer caminho como A-C-D, A-B-D, A-B-C-D ou A-D, desde que todos os elementos possuam ligações entre eles. Esta capacidade fornece à rede uma elevada fiabilidade, pois no caso da falha de um membro, este é o único afectado, podendo as mensagens ser transmitidas por percursos que não o incluem. No caso de quebra da ligação directa entre dois elementos, por falhas na cablagem numa rede física ou obstrução do sinal RF numa rede *wireless*, estes poderão continuar a comunicar desde que os restantes elementos disponibilizem essa ligação [21].

Outra vantagem possuída por uma rede de topologia mesh, reside na possibilidade de transmissão de dados em simultâneo. Ao mesmo tempo que os elementos A e B comunicam entre eles, os elementos C e D podem também comunicar, em determinadas circunstâncias [21].

Na implementação de uma rede *wireless* com este tipo de topologia num sistema multi-robótico, a distância de navegação dos veículos pode ser muito superior, pois apenas um robô necessita de ligação ao posto de controlo do sistema, retransmitindo o robô as mensagens para os outros robôs. No caso extremo, os robôs podem formar um linha de comunicações, onde cada um se liga apenas a um robô, trabalhando como retransmissores.

#### 4.1.4 Modelização de Comportamentos Mútua

Outra das principais características de um sistema multi-robótico, consiste na capacidade que os robôs têm em modelizar as intenções, acções, estados e capacidades dos

outros robôs, para permitir uma boa cooperação do sistema. Esta capacidade torna-se muito importante para um sistema, caso este utilize robôs heterogêneos, para que cada um consiga adequar as suas tarefas às suas capacidades. A necessidade de comunicações entre os robôs pode também ser reduzida com a modelização mútua.

## 4.2 Coordenação de Formações

No campo da coordenação das movimentações de um sistema multi-robótico, a organização das formações é outra das importantes tarefas a analisar para a especificação de diversas missões. Ter um grupo de robôs a actuar de acordo com uma formação, será vantajoso em diversas aplicações, como para exploração de uma área para vigilância ou detecção de minas, busca e salvamento, e outras operações militares de escolta ou captura do inimigo.

As formações podem ser definidas como grupos de robôs que estabelecem e mantêm determinadas formas gráficas, controlando as posições e orientações de cada robô individual, relativamente ao grupo, fazendo com que o grupo se mova como um só elemento. Diferentes problemas podem ser abordados para a utilização de uma formação numa determinada tarefa. Relativamente a cada robô o problema consiste em determinar as suas acções para manter a formação, e relativamente à equipa o problema consiste em determinar quais as acções do grupo de robôs para realizar determinada tarefa. No caso mais simples estes problemas abordam apenas a construção física da formação, e já num caso mais complexo, abordam também a coordenação temporal da formação [22].

### 4.2.1 Características das Formações

Podem ser associadas diferentes características à coordenação de formações. Em [18] e [22] essas características são agrupadas nas três seguintes categorias:

- Características Perceptuais
  - Visibilidade dos outros robôs - A visibilidade dos outros robôs de um sistema pode ser completa ou limitada.
  - Referencial - Os robôs podem-se apoiar em referenciais globais/absolutos ou em referenciais relativos ao próprio sistema.

- Capacidade de comunicação - Podem não utilizar comunicações, podem utilizar comunicação de informação global (de todo o sistema) ou comunicação de informação local (de apenas um robô). As comunicações podem compensar insuficiências nas capacidades sensoriais a um nível global, para coordenar toda a formação, ou a um nível local, como por exemplo a posição de outros robôs que utilizam um referencial absoluto.
- Características de Formação
  - Geometria da formação - Podem estar organizados em diversas formas geométricas como em círculo, linha, triângulo, rectângulo, grelha, entre outras, como em formas arbitrárias.
  - Determinação da posição - Os robôs podem calcular a sua posição relativamente à formação de três formas: “*unit-center-referenced*”, onde o ponto de referência utilizado por cada robô, é a média das posições  $x$  e  $y$  de todos os robôs; “*point-referenced*”, onde o ponto de referência é um ponto único, que poderá ser a posição do veículo líder, ou outro ponto virtual; “*neighbor-referenced*”, onde cada robô mantém a sua posição relativamente a um ou mais robôs na sua vizinhança. Esta última forma será necessária, quando os robôs não têm capacidades de percepção total do grupo de robôs.
  - Restrições de estrutura - As formações podem ser rígidas, preservando a mesma forma ao longo do tempo, ou podem ser flexíveis.
- Características de Controlo
  - Processos de decisão - Podem ser utilizados diferentes tipos de processos de decisão, quando utilizados sistemas descentralizados, sendo estes processos homogéneos quando todos os robôs usam as mesmas regras de decisão, e heterogéneos quando os robôs utilizam diferentes regras de decisão.
  - Dependência de estados temporais - Os robôs podem determinar as suas decisões baseadas nas informações sensoriais recolhidas no instante, ou de uma forma mais inteligente, baseadas também nas informações adquiridas em instantes passados.



- Estratégia de controlo - Podem ser abordadas algumas estratégias de controlo, umas baseadas em leis de controlo, outras baseadas em comportamentos, e também híbridas, que envolvem níveis de supervisão e níveis de execução.

#### 4.2.2 Problemas de Coordenação

Além destas características, a coordenação de formações de um sistema multi-robótico implica ainda a resolução dos seguintes problemas [18][22]:

- Manter a formação ao longo do movimento do grupo. Critérios como manter a estabilidade durante a movimentação em formação e uma resposta robusta a falhas dos robôs são importantes.
- Desvio de obstáculos encontrados nas trajectórias desenhadas. Uma das soluções pode ser a desintegração da formação, apenas pelos membros necessários, restabelecendo essa formação após o contorno do obstáculo. Outra solução poderá ser o desvio de toda a formação, sem que esta se desintegre.
- Modificação da geometria da formação ao longo da movimentação.
- Modo de inicialização e construção da formação. Os veículos poderão organizar-se autonomamente criando a formação, ou terá de existir intervenção dos operadores, colocando os robôs nas posições da formação ou em posições que permitam aos robôs criar a formação posteriormente [23].
- Determinar quais as formações viáveis de construir, utilizando um determinado sistema multi-robótico, em que cada robô poderá ter restrições cinemáticas diferentes.

### 4.3 Tele-operação

A tele-operação é uma forma de controlo de sistemas robóticos e multi-robóticos, onde um ou mais operadores controlam os veículos à distância. Os sistemas tele-operados têm vindo a ser cada vez mais utilizados, especialmente em missões de perigo eminente para o ser humano, nomeadamente em aplicações espaciais, nucleares, submarinas, militares, médicas, e outras aplicações civis como manutenção de linhas de alta tensão.

O modelo típico de tele-operação é constituído pelos seguintes componentes [9][18]:

- O operador humano, que controla o sistema à distância, executando os comandos através de periféricos de controlo e recebendo informações do estado do sistema. O seu controlo pode ser contínuo ou intermitente para controlar, monitorizar e realizar o planeamento da missão.
- O sistema remoto, que poderá ser um robô, uma equipa de robôs ou outro equipamento. É o elemento do sistema de tele-operação que executa os comandos do operador na zona da missão, estando normalmente equipado com actuadores e sensores que devolvem ao operador o estado do meio.
- O canal de comunicações, constituído por dispositivos que modelam, transmitem e adaptam os sinais entre o operador e o sistema remoto. Normalmente são utilizadas redes *wireless* ou redes comerciais de GSM para grandes distâncias.
- A interface de operação, constituída pelos periféricos que permitem ao operador controlar o sistema remoto. Normalmente é constituída por *joysticks*, ratos, teclados, e dispositivos tácteis, e ecrãs que permitem visualizar a informação enviada pelo sistema remoto, como vídeo, leituras de sensores de distância, entre outros.

#### 4.3.1 Modelos de Controlo

Existem, segundo [18] três modelos de controlo para a tele-operação, cada um de acordo com o nível de autonomia do robô e com o nível de decisão atribuída ao operador.

##### Controlo Directo

É o modelo mais comum para tele-operar um veículo. Neste modelo o operador controla o veículo directamente, utilizando um *joystick* ou outro periférico já referido, monitorizando ao mesmo tempo através de vídeo, os movimentos realizados pelo veículo. Embora o veículo possa assistir o operador em algumas situações de perigo previsíveis pelo veículo, o operador terá sempre a responsabilidade de ter a percepção do meio, de tomar as decisões e de as executar.

Este controlo é o mais básico de implementar, no entanto pode ser problemático devido ao facto do operador possuir todo o poder de decisão, obrigando o mesmo a dedicar-se continuamente a esta função. Uma boa percepção do meio pelo operador é influenciada por muitos factores, como as suas capacidades motoras, a sua habilidade e o atraso nas

comunicações do sistema, podendo estes factores levar a erros que poderão ter elevado risco. Por esta razão o operador terá de possuir uma elevada experiência nesta função.

### **Controlo Supervisionado**

Neste modelo o operador separa a missão em sub-tarefas que atribui aos robôs e que estes realizam autonomamente. Durante a actuação autónoma dos robôs o operador verifica, através da interface de operações, o estado dos sensores do veículo, para monitorizar o progresso da missão e verificar se os robôs estão a realizar as tarefas especificadas. Na existência de problemas durante a missão este é responsável por procurar soluções e planear novas tarefas para os robôs. A sua operação não necessita de ser totalmente de supervisão, podendo este, quando achar necessário, controlar directamente o robô ou controlar apenas alguns dispositivos de um robô, enquanto este se move autonomamente.

Um dos problemas deste modelo poderá ser a existência de falhas na missão, caso o operador não perceba que um determinado robô é desadequado para a tarefa atribuída. O operador está também limitado a controlar um reduzido número de robôs, embora no controlo directo este problema seja ainda mais elevado, pelo facto de no controlo supervisionado o robôs já realizarem algumas tarefas autonomamente. Outro problema consiste na habilidade do operador para ter a noção do meio em que se encontra o robô. O operador necessita de ter sensibilidade para perceber o que o robô está a fazer, e para saber quando o mesmo se encontra com problemas. Se a interface de operação for fraca, o operador pode criar uma imagem incorrecta do estado dos robôs, podendo esta resultar em danos no sistema.

### **Controlo Autónomo**

Neste tipo de modelo o operador atribui tarefas de alto nível ao sistema de robôs, que estes realizam autonomamente. Os robôs são capazes de planear as suas pequenas tarefas, determinando as melhores rotas, formas de actuação e distribuição de tarefas, antes, e durante a execução. É o modelo que qualquer equipa de desenvolvimento em veículos autónomos espera atingir, onde o robô trata de praticamente tudo. O operador passa aqui a ter apenas uma função de supervisão, além da especificação de alto nível da missão, onde este monitoriza as tarefas também através da interface de operação. As mesmas limitações existentes no sistema supervisionado são também neste tipo de controlo um problema,

mas a capacidade de execução da tarefa pelo sistema de robôs perde a dependência das capacidades do operador.

### **Outros Modelos**

Existem outros modelos de controlo implementados em alguns sistemas, onde a performance da missão depende da cooperação entre os robôs e o operador. O robô deixa de ser apenas uma ferramenta para a realização da missão, passando a ser um elemento do sistema de planeamento e decisão. Em alguns destes sistemas os robôs operados criam um diálogo com o operador, sendo a decisão da melhor acção a tomar determinada pelos dois elementos. Esta relação trás melhorias na capacidade de operação do sistema, mas impede que o operador possa agir, no caso dos robôs não serem capazes de continuar o seu planeamento.

## Capítulo 5

# Projecto

### Conteúdo

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>5.1</b> | <b>Sistema Multi-Robótico . . . . .</b> | <b>35</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Plataforma LINCE . . . . .</b>       | <b>37</b> |
| 5.2.1      | Arquitectura Funcional . . . . .        | 37        |
| 5.2.2      | Arquitectura de Hardware . . . . .      | 39        |

---

De acordo com as especificações desenvolvidas no capítulo 3, é neste capítulo projectado um sistema multi-robótico baseado em sistemas já desenvolvidos anteriormente no Laboratório de Sistemas Autónomos. São também projectadas aqui alterações a realizar nas plataformas robóticas de forma a aumentar as suas capacidades autónomas.

### 5.1 Sistema Multi-Robótico

O sistema projectado será constituído pelas plataformas LINCE, apoiadas por sistemas UAV actualmente em desenvolvimento, por consolas de operação e dispositivos de comunicações entre eles.

O sistema de robôs usará uma arquitectura descentralizada, para que todos os robôs possam trabalhar independentemente, no entanto será necessário, em diversos tipos de missões, que exista uma hierarquia entre os robôs. Neste caso o elemento coordenador é que trata de decidir qual a melhor formação e quais os métodos a utilizar para garantir essa formação, quando necessário. A arquitectura suportará também robôs heterogéneos,

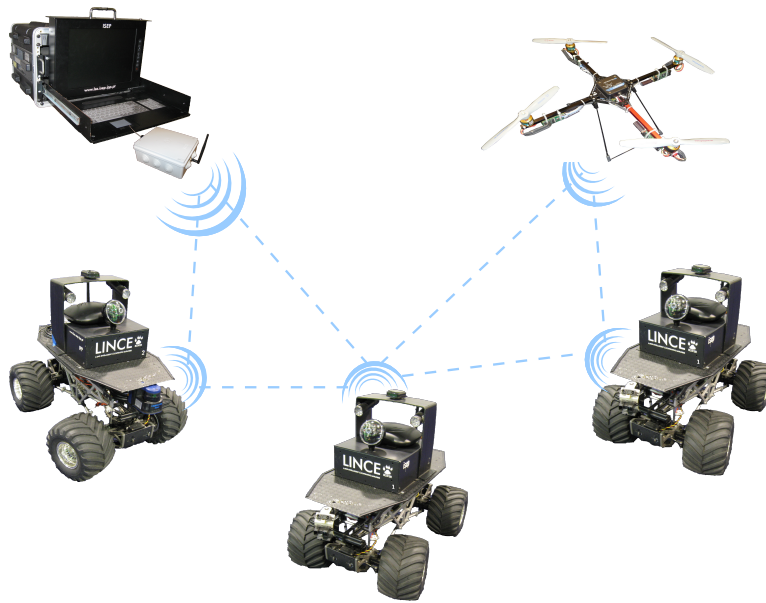


Figura 5.1: Sistema multi-robótico projectado

para que os veículos do sistema possam ser adaptados para as diferentes missões. A arquitectura utilizará também métodos que permitam aos operadores utilizar tanto o controlo supervisionado como o controlo directo de cada robô.

A localização dos veículos será sempre apoiada por sensores GPS e outros sensores de posição relativa, em que estes contribuem para melhorar a estimação da localização e se tornam essenciais em zonas de inexistência de informação GPS. A arquitectura aplicada nos robôs terá de permitir a partilha mútua de informação da posição de cada robô. No entanto, em casos de perda de comunicações, os veículos poderão utilizar algoritmos de reconhecimento da posição dos membros da equipa.

A interacção entre os veículos será realizada com base em redes de comunicação *wireless* com topologias mesh, para possibilitar a extensão da rede através dos veículos, entre outras vantagens enunciadas na secção 4.1.3. Para tal serão aplicados dispositivos de rede com suporte da norma IEEE 802.11s *draft*.

Conceptualmente os veículos utilizados terão de permitir a utilização de arquitecturas hierárquicas genéricas, permitindo as comunicações de acordo com a Figura 5.2. Cada camada da arquitectura, seja de supervisão, coordenação ou funcional, poderá partilhar informação com as camadas homólogas dos outros membros da equipa, de forma a actuarem como um único sistema, e não como uma equipa de robôs independentes. Existirá ainda outra camada de supervisão do sistema, de nível superior que comunica com todos

os robôs, e que tanto poderá ser realizada por sistemas autónomos como pela actuação humana.

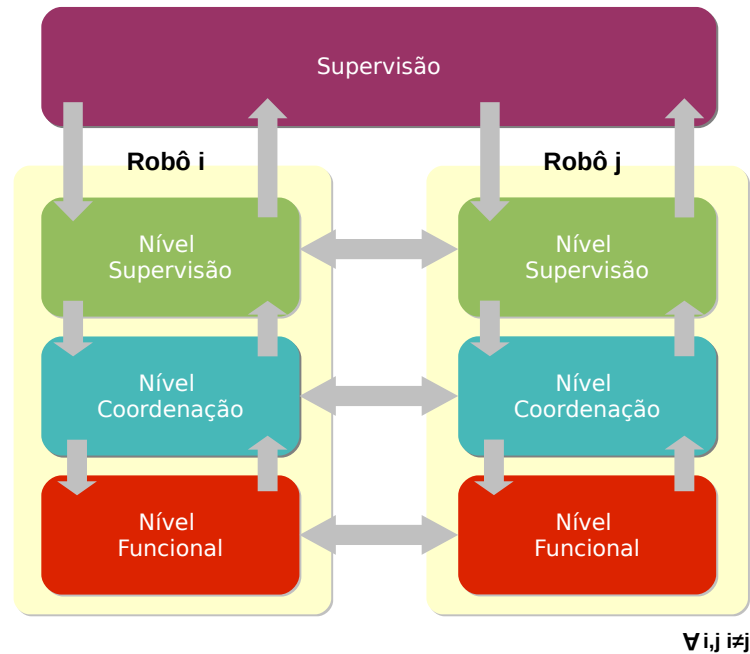


Figura 5.2: Diagrama conceptual de partilha de dados do sistema

## 5.2 Plataforma LINCE

### 5.2.1 Arquitectura Funcional

Embora a plataforma LINCE Rover se encontrasse já em funcionamento no início deste trabalho, as suas funcionalidades limitavam-na à utilização tele-operada. Para atender aos requisitos do trabalho, fazendo com que os veículos adquirissem autonomia, foram projectadas algumas alterações. A Figura 5.3 ilustra o diagrama funcional dos veículos LINCE de acordo com as alterações necessárias. Estas, consistem principalmente na introdução dos sensores ilustrados, que fornecem informação que permite que os veículos processem as componentes de planeamento, percepção, navegação e controlo, que o tornam autónomo.

O dados brutos de cada sensor, numa primeira fase, passam por processos que transformam os mesmos em informação. Possíveis sensores de distâncias como sensores de *Sonar*, sensores de IR e *Laser Range Finders* fornecem informação para a detecção de obstáculos e também para navegação do veículo, pois o veículo pode-se apoiar nessa informação para se localizar. A câmara de vídeo poderá fornecer informação para os mesmos

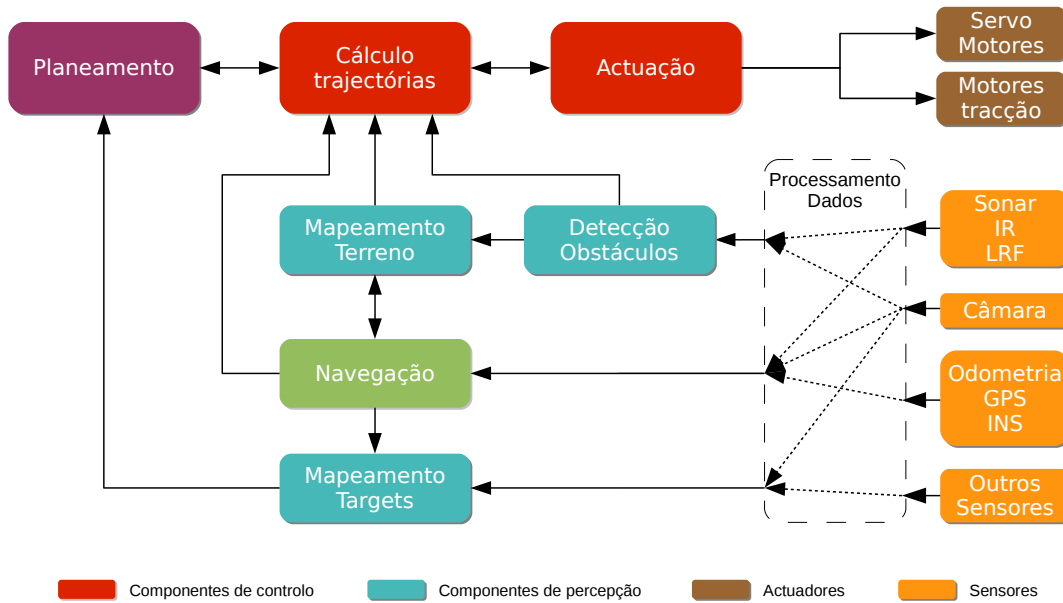


Figura 5.3: Diagrama funcional da plataforma LINCE

blocos, e também para o mapeamento de *targets*, como por exemplo para a localização de vítimas. Sensores de posição absolutos como GPS, ou sensores relativos como INS e sensores de odometria, fornecem informação que apoiam o veículo na sua localização, e esta irá permitir a navegação do mesmo. Outros sensores apropriados para missões específicas, como detectores de metais para a pesquisa de minas ou sensores de substâncias químicas, poderão também fornecer informação para a detecção dos *targets*.

A detecção de obstáculos fornece informação para o mapeamento do terreno, mas também directamente para o cálculo de trajectórias quando se detectam obstáculos dinâmicos em movimento. O mapeamento do terreno fornece informação tanto para o cálculo de trajectórias como para a navegação do veículo, e apoia-se também nos dados da localização e orientação do veículo, provenientes da navegação, para a criação dos mapas. O planeamento, apoiado pelas informações dos *targets* mapeados, toma decisões quanto aos próximos pontos a atingir. O cálculo de trajectórias, tendo a informação desses pontos, apoia-se nos mapas, localização do veículos e nos obstáculos dinâmicos, para actualizar as trajectórias esperadas, ao longo do deslocamento. Por fim, um último bloco actua sobre os motores do veículo, para fazer com que o mesmo se desloque segundo as trajectórias determinadas.



### 5.2.2 Arquitectura de Hardware

A plataforma já existente incluía no seu hardware um computador de bordo, câmara de vídeo com uma base *pan&tilt*, uma placa de controlo de motores *Pandora* (6.1.7), motores DC para a tracção, servo motores analógicos de RC para a direcção e um AP que garantia comunicações com uma consola de operação. O computador de bordo tinha como função receber os dados operacionais através da consola, e aplicar todas as instruções nos motores e no *pan&tilt* da câmara, para permitir a tele-operação do veículo. O controlo do motor de tracção, bem como dos servo-motores da direcção e da iluminação do veículo, era efectuado pela *Pandora* (6.1.7).

Foi projectada a introdução dos sensores já referenciados, e para a ligação dos mesmos foi desenhada a arquitectura da Figura 5.4, baseada num barramento CAN, que permite uma comunicação rápida (1 Mb/s) e de baixa latência entre os sensores, actuadores e as unidades de processamento. Como grande parte dos sensores não possui capacidade de comunicação pelo barramento CAN, foi também projectado um dispositivo de interface entre os sensores e o barramento. Com a necessidade de introdução de novos dispositivos, surgiu também a necessidade de um novo dispositivo de distribuição e gestão de energia do veículo.

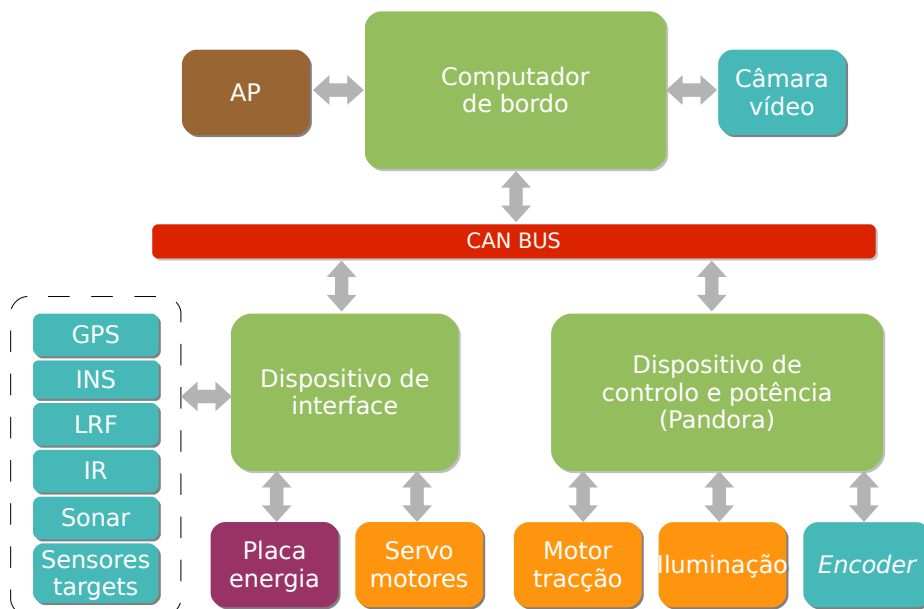


Figura 5.4: Arquitectura de hardware projectada

Para os sensores de odometria foi projectada a utilização de *encoders* incrementais nas

rodas dos veículos ou no eixo do motor, e a substituição dos servo-motores analógicos por uns digitais que fornecem *feedback* da posição da direcção do veículo. Projectou-se para a comunicação entre os novos servo-motores e o barramento CAN, a utilização do mesmo dispositivo de interface.

## Capítulo 6

# Sistema Desenvolvido

### Conteúdo

---

|            |                                   |           |
|------------|-----------------------------------|-----------|
| <b>6.1</b> | <b>Plataforma LINCE</b>           | <b>41</b> |
| 6.1.1      | Arquitectura de Hardware          | 42        |
| 6.1.2      | Sensores                          | 43        |
| 6.1.3      | Actuadores                        | 47        |
| 6.1.4      | Comunicações                      | 48        |
| 6.1.5      | Placa de Gestão de Energia        | 48        |
| 6.1.6      | STM32                             | 50        |
| 6.1.7      | Pandora                           | 52        |
| 6.1.8      | Computador de Bordo               | 52        |
| <b>6.2</b> | <b>Consola de Operações</b>       | <b>53</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Outros Testes e Resultados</b> | <b>54</b> |
| 6.3.1      | Sensores IR                       | 54        |
| 6.3.2      | STM32                             | 58        |
| 6.3.3      | Servo-motores Digitais            | 59        |

---

Neste capítulo é descrita a constituição dos vários componentes do sistema, bem com as alterações efectuadas nas plataformas LINCE.

### 6.1 Plataforma LINCE

Os veículos LINCE têm como base mecânica a plataforma comercial de RC TXT-1 da Tamyia Inc. Esta plataforma à escala 1/10 tem tracção às quatro rodas e direcção frontal

e traseira, com uma suspensão que permite a sua utilização tanto em laboratório como em zonas *outdoor* acidentadas. Devido à necessidade de carga de um computador, sensores, entre outros, as molas da suspensão foram substituídas por outras mais fortes.

### 6.1.1 Arquitectura de Hardware

Com as alterações efectuadas, a plataforma passa agora a integrar também, como sensores, um módulo de GPS, um INS, um *Laser Range Finder*, um *encoder* incremental e sensores de distância IR. Além dos sensores, foram integrados novos servo-motores digitais com realimentação de posição e corrente e desenhada uma placa de distribuição de energia e uma placa de processamento e interface baseada num micro-controlador STM32, para controlar os servo-motores digitais, os sensores IR e a gestão de energia.

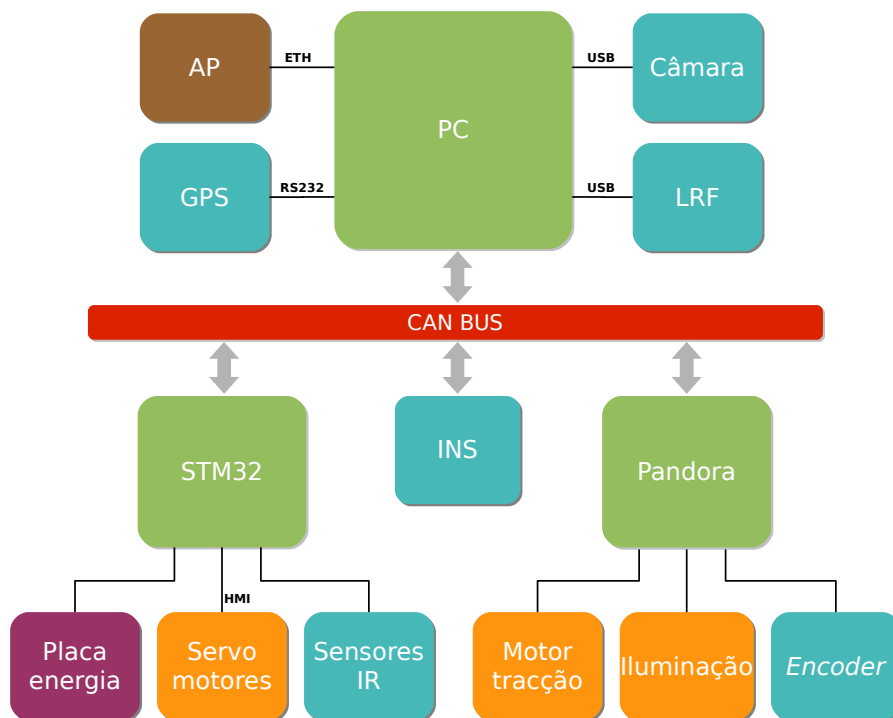


Figura 6.1: Diagrama de comunicações do hardware do LINCE

Para a comunicação entre todos os dispositivos, foi aplicada a arquitectura ilustrada na Figura 6.1. Os módulos de GPS e *Laser Range Finder* são ligados directamente ao computador de bordo, uma vez que possuem comunicação RS-232 e USB, respectivamente, retirando também carga excessiva sobre o STM32. O módulo INS integra já comunicação CAN, não necessitando assim do interface adicional. A Pandora (6.1.7) comunica também

com o computador pelo barramento CAN, dispõe de *drivers* para controlo do motor de tracção e da iluminação do veículo, e lê os dados do *encoder* incremental. Para o controlo dos servo-motores digitais pelo STM32, é utilizado o protocolo digital HMI que utiliza uma ligação física RS-232 *Daisy Chain* de uma linha, e os sensores IR retornam sinais analógicos. O STM32 actua também sobre a placa de gestão de energia através de sinais digitais, e recebe da mesma informação através de sinais analógicos. Uma melhor descrição das comunicações do STM32 é desenvolvida na secção [6.1.6](#).

### 6.1.2 Sensores

#### GPS

Foi integrado um módulo de GPS SUPERTAR II da Novatel. Este receptor de 12 canais, suporta a recepção da fase da portadora para uma posição mais precisa, e fornece as informações de posição, velocidade e tempo a uma frequência de 1 Hz com um consumo de 0,8 Watt. Embora algumas das versões do mesmo suportem uma frequência de 5 Hz, utiliza-se a versão de 1 Hz uma vez que o veículo possui uma velocidade reduzida. Este suporta também sistemas de correcção SBAS, como o WAAS e o EGNOS. Para interface este módulo disponibiliza o protocolo binário L1 da Novatel ou o protocolo standard NMEA em sinais TTL. Foi então acrescentado ao mesmo um *transceiver* de RS232 para a comunicação directa com o PC pela porta COM, estando o módulo de GPS configurado para enviar as informações GGA, GVS e RMC do protocolo NMEA.

A posição global, orientação e velocidade do veículo serão dadas por este módulo ao sistema, no entanto este irá fundir todos esses dados com os dados do sensor inercial, *encoder*, e realimentação dos servo-motores, caso os mesmos se encontrem ligados ao sistema.

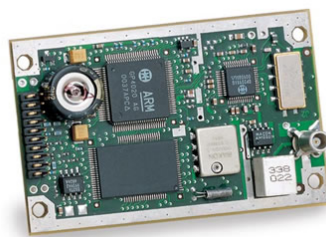


Figura 6.2: Módulo de GPS SUPERSTAR II

## INS

O módulo de navegação inercial integrado foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Autónomos e é composto por um microprocessador ARM7 LPC2129 com interface CAN, acelerómetros de três eixos LIS3LV02 da ST, giroscópios CRS10 da Silicon Sensing e sensores de campo magnético de três eixos MicroMag da PNI Corp [24].

Com as medidas destes sensores, são calculados dados de velocidade, posição e orientação do veículo a partir de um ponto inicial, no entanto, como se tratam de dados incrementais, obtidos em relação aos dados do instante anterior, os erros tendem a aumentar exponencialmente com o tempo [25] [26]. Sendo assim, os dados obtidos desde sensor, serão sempre alvo de fusão com dados de sensores absolutos como o GPS. Permitem também dar ao veículo e ao operador, informação da sua inclinação para prever possíveis quedas do veículo.

## Odometria

O motor integrado no veículo inclui um *encoder* incremental de 500 impulsos por rotação, e os servo motores da direcção integram também um protocolo digital de comunicação que fornece *feedback* da posição da direcção. Estes dados permitem também obter posições relativas e velocidades de rotação e translação do veículo.

## *Laser Range Finder*

Foi também adicionado um *laser range finder* colocado na frente do veículo, que se encontra ligado directamente ao PC por USB. Este tipo de sensores emite um feixe laser e calcula a distância a qualquer objecto onde o feixe incida. Fazendo o mesmo feixe rodar sobre um plano, permite-nos obter um mapa 2D do cenário envolvente [27], como ilustrado na Figura 6.3(b).

O LRF utilizado é o UBG-04LX-F01 da Hokuyo (figura 6.3(a)), pesa apenas 260 g, consome 4,5 Watt e faz varrimentos numa área de 240°, de 20 mm até 5,6 m de distância, com uma resolução de 0,36° e precisão de 10 mm, a uma taxa de 35 varrimentos por segundo (28 ms por varrimento).

No caso ideal, cada veículo deveria ter sensores que permitissem a detecção de obstáculos em qualquer ângulo de incidência. A melhor solução para uma boa precisão e velocidade na aquisição dos dados, seria a utilização de dois LRF por veículo, um orientado para

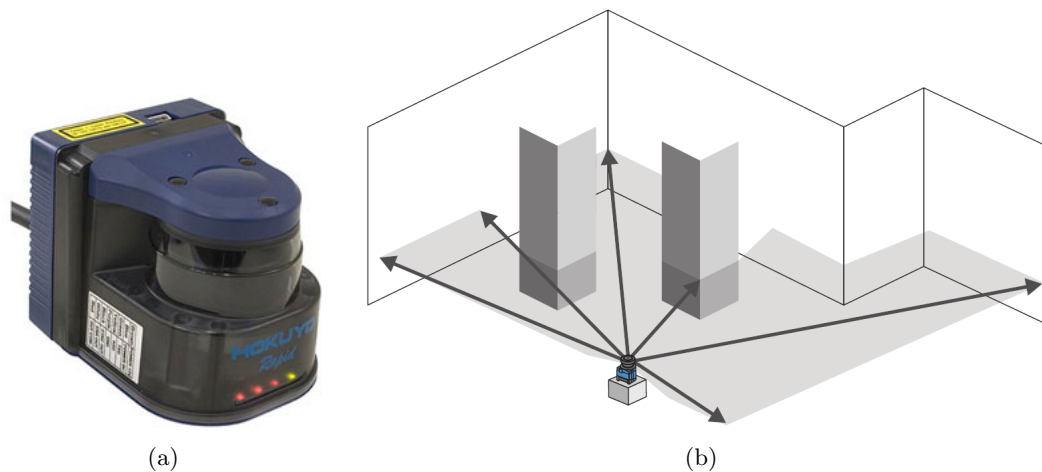


Figura 6.3: a) Hokuyo UBG-04LX-F01 [28]. b) Varrimento 2D de um LRF [29].

a frente e outro para trás. No entanto, devido ao preço dos mesmos, até ao momento o Laboratório de Sistemas Autónomos pôde adquirir apenas um LRF, que será utilizado num dos veículos. Para os outros veículos e mesmo para a traseira do veículo que utiliza o LRF, foi desenhada uma solução mais barata com base em sensores IR.

### IR Range Finder

Os sensores IR utilizam o princípio da triangulação para calcular a distância aos objectos. Um LED emite luz IR, e caso exista algum objecto que reflita a luz, uma lente precisa, colocada a uma pequena distância do emissor, transmite essa luz para as várias células de um sensor linear CCD, que detecta o ângulo de incidência dessa reflexão, sendo esse ângulo proporcional à distância ao objecto [26] [27] [30].

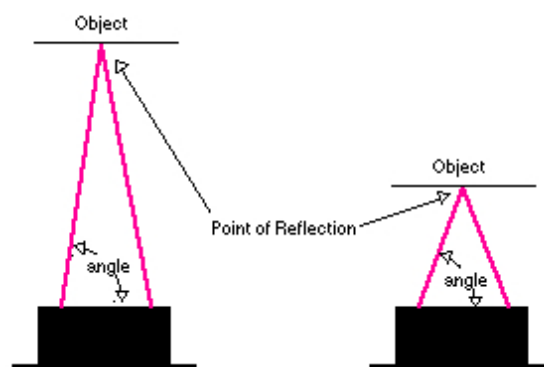


Figura 6.4: Triangulação dos sensores IR [30]

Foram utilizados 2 modelos de sensores IR, os Sharp GP2Y0A02 com capacidade de detecção dos 20 cm aos 150 cm, e os Sharp GP2D12J dos 10 cm aos 80 cm. Colocando estes sensores fixos num servo motor em rotação, criou-se assim um *IR range finder* que faz um varrimento de 180°, permitindo a detecção de obstáculos nessa área. Os sensores de detecção de 150 cm de distância são utilizados para fazer varrimentos no plano horizontal, enquanto que os sensores de detecção de 80 cm, são colocados com 45° de desfasamento em relação ao plano horizontal, para baixo para detectar oscilações no terreno e pequenos obstáculos, e para cima para evitar colisões em locais de baixa altitude. Estes sensores têm saída de sinal analógica e estão ligados ao STM32, que trata os dados e os envia posteriormente por CAN para o PC.

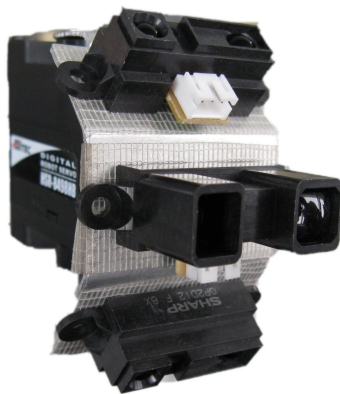


Figura 6.5: *IR range finder*

Em relação a todos os outros sensores possíveis para este tipo de tarefa, os sensores IR são os de mais simples implementação, mais baratos, que detectam distâncias razoáveis com uma abertura do feixe de IR pequena, permitindo também uma resolução razoável, com boa imunidade à interferência da luz ambiente e indiferença à cor do objecto reflectido. Na secção 6.3.1 são ilustrados alguns resultados destes sensores.

### Câmara de vídeo

A plataforma LINCE Rover incluía já uma câmara de vídeo Logitech QuickCam Sphere AF, com um sistema *pan&tilt*, utilizada para a tele-operação do veículo. Esta, com a utilização de algoritmos dedicados no PC, poderá permitir que os veículos se reconheçam e se localizem mutuamente e poderá utilizar técnicas de segmentação da imagem para detectar obstáculos, reconhecer pessoas, entre outros.



### 6.1.3 Actuadores

#### Motor de tracção

Para fornecer ao veículo mais binário e menos velocidade, os dois motores originais da plataforma TXT-1 foram substituídos por um motor Pittman GM9236S021 com caixa redutora de relação 19,7:1 e um *encoder* integrado de 500 impulsos, como já referido. Este motor é capaz de fornecer um binário contínuo de 11 Kg.cm e um binário de pico de 62 Kg.cm, com uma tensão de alimentação de 24 V. O controlo deste motor, bem como a leitura do *encoder* do mesmo é feito pela Pandora.



Figura 6.6: Motor Pittman GM9236S021

#### Servo motores

Os servo motores analógicos de RC foram substituídos por servo motores digitais, devido à necessidade de realimentação da direcção do veículo e também pelo binário dos mesmos. Os servo motores analógicos utilizados forneciam um binário máximo de 9,6 Kg.cm, que por vezes não era suficiente para o veículo navegar em terrenos acidentados, chegando muitas vezes à ruptura dos servos por insistência do tele-operador.

Os servo motores digitais Hitec HSR-5980SG adaptados além de fornecerem um binário máximo de 30 Kg.cm com uma tensão de alimentação de 7,4 V, possuem uma protecção anti-ruptura que desliga o servo após 10 segundos de bloqueio. A sua interface é feita através do protocolo de alto nível HMI (Hitec Multi-protocol Interface) proprietário da Hitec, que permite a ligação de até 128 servo motores num barramento RS-232C *Daisy Chain*, utilizando apenas uma linha de dados. Este protocolo permite obter *feedback* de posição, corrente e tensão de alimentação de cada servo motor.

Os servo motores fazem internamente o controlo de velocidade e posição, estando o STM32 a fornecer os *setpoints* das posições e a receber o *feedback* do servo, fazendo a interface com o PC.



Figura 6.7: Servo motor HSR-5980SG

#### 6.1.4 Comunicações

Até à data, para a comunicação entre os veículos e a consola de operações é utilizada uma rede de topologia em estrela, possuindo cada veículo um *Access Point* AirLive WLA-5000AP, com suporte das normas IEEE 802.11a/b/g. No entanto, encontra-se já em desenvolvimento no Laboratório de Sistemas Autónomos um projecto para a implementação de comunicações de topologia mesh, norma IEEE 802.11s, para integração nestes veículos.

#### 6.1.5 Placa de Gestão de Energia

Para atender aos requisitos de hardware foi também desenhada uma nova placa de gestão de energia, visto que a anterior apenas regulava e distribuía as tensões para os vários dispositivos. Esta possui agora um DC-DC de 24 V para 5 V, um DC-DC de 24 V para 7,4 V, corte individual das linhas de alimentação de cada dispositivo, corte manual de emergência do motor e leitura das correntes consumidas e das tensões das baterias. Os 5 V são distribuídos pelo AP, GPS, Sensores IR, INS e STM32, e os 7,4 V alimentam os circuitos dos servo motores. Está também disponível uma *slot* adicional para um terceiro DC-DC de 7,4 V, no caso da utilização de dois servo motores para a direcção, que podem consumir correntes elevadas. Os mecanismos de corte individual da alimentação de cada dispositivo, irão possibilitar a redução dos consumos no caso da inutilização dos mesmos, e permitir reiniciar os dispositivos numa situação de bloqueio. A leitura das correntes e tensões permitirá analisar os consumos para fazer a gestão das baterias. Todas as operações de corte de alimentações e gestão de baterias estão a cargo do STM32.

Encontram-se no Anexo A.1 o esquema eléctrico e *layout* desta placa.

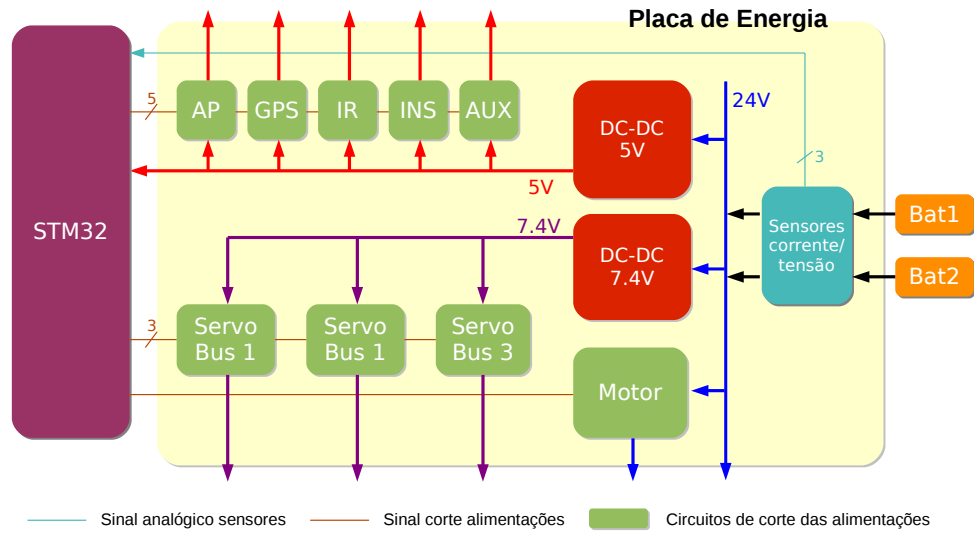


Figura 6.8: Diagrama funcional da placa de gestão de energia

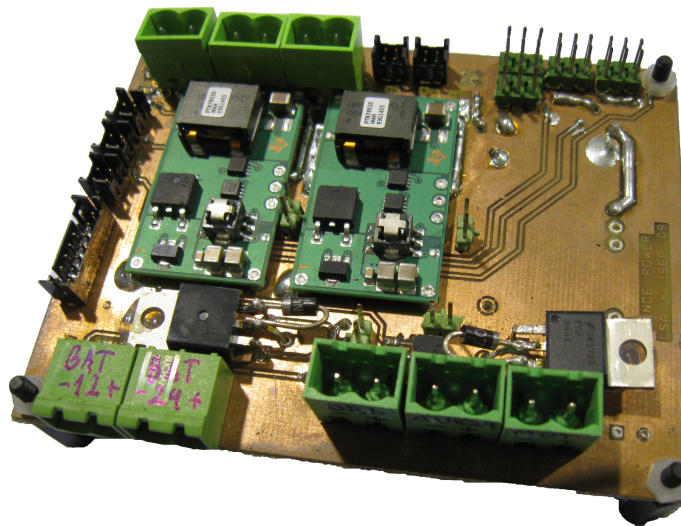


Figura 6.9: Placa de gestão de energia

### 6.1.6 STM32

Com a necessidade de introdução de novos sensores e da placa de energia no sistema, tornou-se também necessário integrar um dispositivo de controlo e comunicação de baixo nível, que fizesse a interface com o computador. Existia já no laboratório uma versão preliminar de uma placa com um microprocessador STM32, alvo de uma validação que demonstrou algumas deficiências que impossibilitavam a sua utilização. Procedeu-se então, no âmbito deste trabalho, ao desenho de uma nova placa que corrigisse todos os erros da versão preliminar, para a poder utilizar nas plataformas LINCE.

A versão anterior tinha sido desenhada para utilizar microprocessadores STM32F103RE da *Performance line*, que integra entre outros, periféricos de comunicações SPI, I2C, USART e CAN, e oito *timers* de 16 bit e três ADC de 12 bit, com um núcleo ARM Cortex-M3 capaz de velocidades de 72 MHz. A nova placa foi já desenhada com suporte para os novos microprocessadores STM32F107RC da *Connectivity line*, que suportam comunicação *Ethernet* além das funcionalidades já enunciadas, permitindo também o funcionamento dos STM32F103RE. Embora a plataforma LINCE não necessite do suporte de *Ethernet* neste módulo, essa funcionalidade foi adicionada para permitir a utilização desta placa noutros projectos do Laboratório de Sistemas Autónomos. A placa desenhada integra três *transceivers* RS-232, um CAN e um Ethernet com conectores dedicados, conectores I2C e SPI, permite a programação do microprocessador através de JTAG ou pela UART, e disponibiliza todos os restantes pinos do microprocessador. Encontram-se no Anexo A.2 o esquema eléctrico e *layout* desta placa.

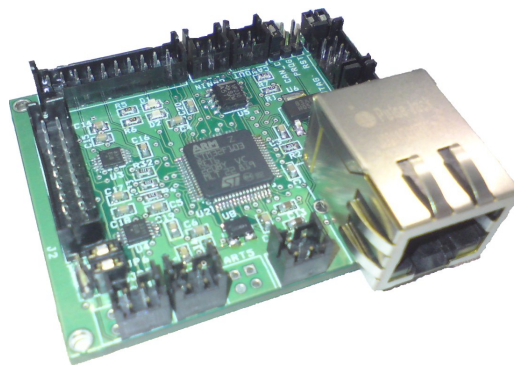


Figura 6.10: Placa do STM32

A Figura 6.11 representa as funções desempenhadas pelo STM32 na plataforma LINCE. Foram desenvolvidas bibliotecas de controlo dos servos motores digitais que utilizam o protocolo HMI, com funções para definir a posição e velocidade de rotação do motor, funções para obter *feedback* da posição, corrente e tensão de alimentação, e funções de auto configuração dos limites mínimos e máximos de excursão do servo motor, quando aplicado na direcção do veículo. Para o controlo do IR *Range finder* foram também desenvolvidas bibliotecas com funções de leitura dos valores dos sensores, transformando esses valores em distâncias para envio dos dados através do barramento CAN para o PC, e funções que permitem ao veículo ou operador, configurar a área de varrimento a detectar, a resolução do varrimento e a velocidade de rotação do servo motor, que suporta os sensores IR.

No que concerne à gestão de energia, as bibliotecas desenvolvidas integram funcionalidades que permitem a leitura das correntes e tensões de alimentação, e a comutação da alimentação de cada dispositivo. Os processos de cálculo dos consumos e estado das baterias, bem como a decisão de comutação das alimentações de cada dispositivo, estão a cargo do computador que comunica com este módulo pelo barramento CAN.

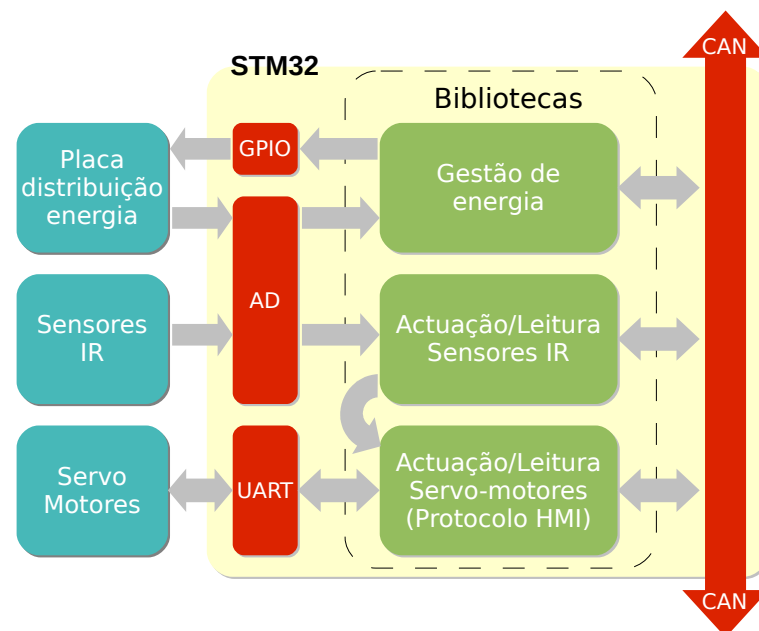


Figura 6.11: Diagrama funcional do STM32

### 6.1.7 Pandora

O controlo do motor de tracção desta plataforma é realizado pela Pandora, um módulo embebido desenvolvido no Laboratório de Sistemas Autónomos, que desempenha funções de controlo em velocidade e posição. Este módulo é constituído por um DSP dedicado com interface de barramento CAN, e um *driver* de potência integrado, adequado para uma categoria de motores, suportando também a adição de componentes de potência externos para se adaptar a motores de potências mais elevadas. Integra também sensores de corrente, que fornecem uma capacidade diagnóstico e controlo em binário, e um descodificador de quadratura para *encoders* incrementais. Nesta plataforma, além do controlo do motor de tracção, este módulo era também responsável pela actuação na iluminação do veículo e pela actuação dos servo motores analógicos, sendo esta última funcionalidade desactivada, pela integração dos novos servo motores digitais.

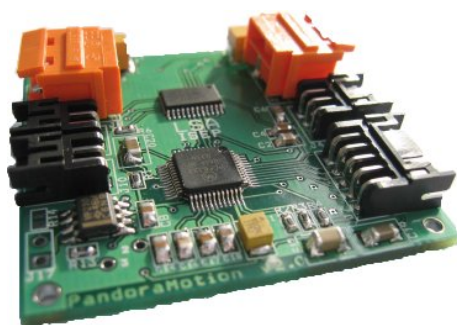


Figura 6.12: Módulo de controlo de motores Pandora

### 6.1.8 Computador de Bordo

O computador integrado nos veículos possui um processador Via C7 de 1,5Ghz, e para além dos periféricos genéricos como portas série, USB e *ethernet*, inclui um conversor de porta paralela para o barramento CAN, de forma a comunicar com o restante sistema do veículo. É incluído ainda um adaptador que permite ligar um cartão *Compact Flash* no barramento IDE, onde é guardado todo o software.

O computador corre o sistema operativo Fedora Core baseado em Linux, onde é executado o programa desenvolvido no Laboratório de Sistemas Autónomos, que realiza todas as operações definidas pelo utilizador numa consola operacional. No âmbito deste trabalho foi integrado na plataforma uma nova versão do software, que possui agora um gestor de missões.

O gestor de missões carrega ficheiros XML onde o utilizador define toda a estratégia da missão, como as tarefas que o veículo tem de executar e o que necessita de saber para completar as suas tarefas. Os ficheiros XML estão organizados em manobras, acções e transições. Todas as manobras definidas são as necessárias para a realização das tarefas, e para que cada manobra seja implementada são executadas uma ou mais acções. Durante a manobra, caso se verifique que esta não é a mais indicada são executadas transições para outras manobras mais apropriadas [31]. Um exemplo da utilização do gestor de missões poderá ser o seguinte: É atribuído ao veículo uma localização a atingir. Para alcançar esse ponto o veículo define a manobra “atingir ponto”, mas durante a execução depara-se com um obstáculo. No ficheiro criado para a missão está definida a transição para outra manobra, caso o veículo se depare com o mesmo obstáculo. O veículo transita então para a manobra “circular obstáculo” que poderá ser constituída por diversas acções (rectas, curvas, etc). Assim que terminada esta manobra, volta a transitar para a manobra “atingir ponto”.

## 6.2 Consola de Operações

Para a operação dos veículos LINCE é utilizada a LINCE Mission Control, uma aplicação gráfica desenvolvida no Laboratório de Sistemas Autónomos. Esta aplicação permite aos operadores visualizar um mapa devidamente calibrado com as posições GPS do local e com a localização e orientação actual dos veículos, uma imagem em tempo real obtida pela câmara dos veículos e os estados dos vários sensores.

O painel de instrumentos está dividido no painel de tele-operação, painel de monitorização e painel da missão. No painel de tele-operação são definidos os comandos que actuam na locomoção do veículo, estando estes também disponíveis no *joystick*. No painel de monitorização é ilustrada a velocidade do veículo, o estado de cada componente do sensor inercial, o estado das comunicações com o veículo e o estado das baterias. Terão ainda de ser adaptados componentes para a visualização do estado dos novos sensores adaptados nos veículos.

O operador pode definir directamente no ecrã os *waypoints* da trajectória pretendida, rectas a cumprir pelos veículos e áreas de pesquisa. No painel da missão quando definido o início da missão, são enviados para os veículos os dados da missão planeados no ecrã, em formato XML. No veículo, o gestor de missões encarrega-se de processar esses dados. Com



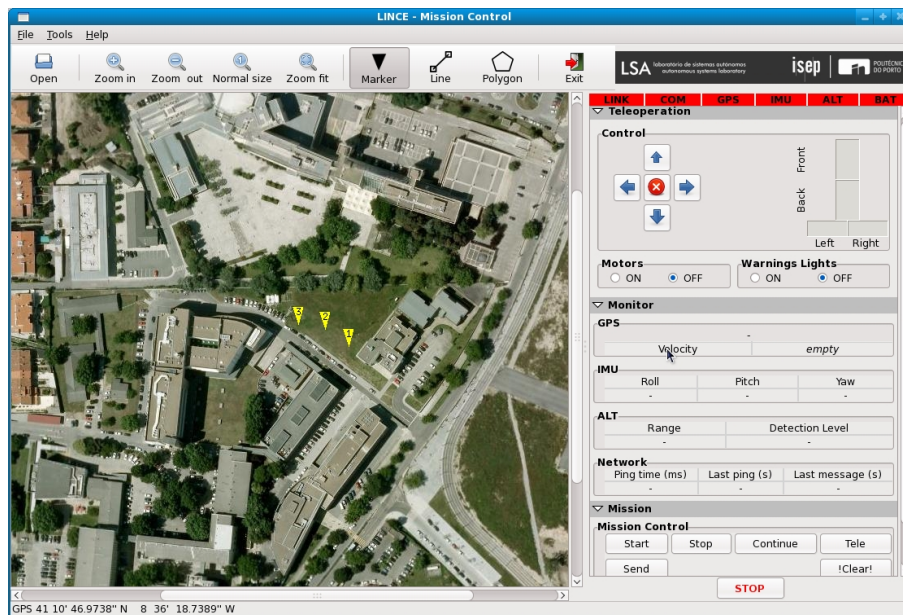


Figura 6.13: Aplicação de operação LINCE Mission Control

a utilização deste formato, permite-se que a missão tanto possa ser definida no local pelos operadores, como possa ser definida previamente, encarregando-se o operador apenas de supervisionar a execução da missão.

## 6.3 Outros Testes e Resultados

### 6.3.1 Sensores IR

#### Análise

Para o desenvolvimento do *IR range finder* foram validados diferentes modelos de sensores. Foram analisados os sensores Sharp GP2D02, um modelo já descontinuado, mas com stock existente no Laboratório de Sistemas Autónomos. Este sensores apresentam uma vantagem em relação aos sensores utilizados, visto que utilizam um protocolo digital especificado pela Sharp, que fornece a capacidade de sincronismo do sensor. O utilizador especifica o instante em que o sensor emite o sinal IR através de uma linha de *clock*, e recebe na linha de dados o valor correspondente à distância detectada. No entanto, detectou-se um problema nos limites de detecção do sensor. Quando o sensor não detecta qualquer obstáculo o valor retornado é superior aos valores de detecção para as distâncias máximas especificadas, impossibilitando a detecção de distâncias superiores a 50/60 cm.



A Figura 6.14, ilustra o gráfico de resposta do sensor, onde é possível verificar (a vermelho) a resposta aproximada nos momentos de inexistência de obstáculos.

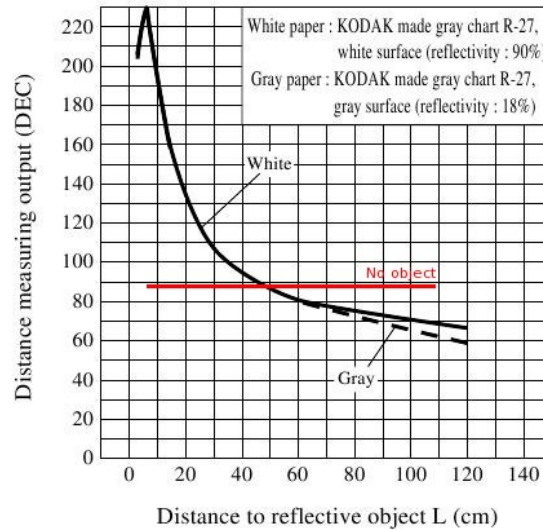


Figura 6.14: Resposta do sensor Sharp GP2D02

Devido ao problema encontrado com este sensor, adquiriram-se os novos sensores referenciados na secção 6.1.2, que não apresentam o mesmo problema, mas que dispõem apenas de saída analógica e assíncrona. Em qualquer um dos sensores referenciados existe sempre a gama de distâncias abaixo da distância mínima especificada pelo fabricante, onde o resultado do sensor volta a ser inadequado, exigindo uma atenção redobrada para não permitir que o veículo se aproxime de mais dos obstáculos. Esta resposta a distâncias reduzidas é também visível na Figura 6.14.

### Calibração

Uma vez que os sensores dispõem de uma saída analógica não linear referente à distância detectada, no STM32 é realizada a conversão dos valores obtidos para as distâncias reais. O gráfico da Figura 6.15 ilustra os resultados obtidos da calibração de um dos sensores, utilizando a média de várias medições realizadas para distâncias fixas.

A função obtida pela regressão dos valores do gráfico da Figura 6.15, apresenta alguns desvios dos valores obtidos, que introduzem um erro considerável. De forma a diminuir esse erro, dividiram-se os valores obtidos e construíram-se os dois novos gráficos da Figura 6.16 passando a ter uma função diferente para cada gama de valores, em que estas têm já um coeficiente de correlação superior.

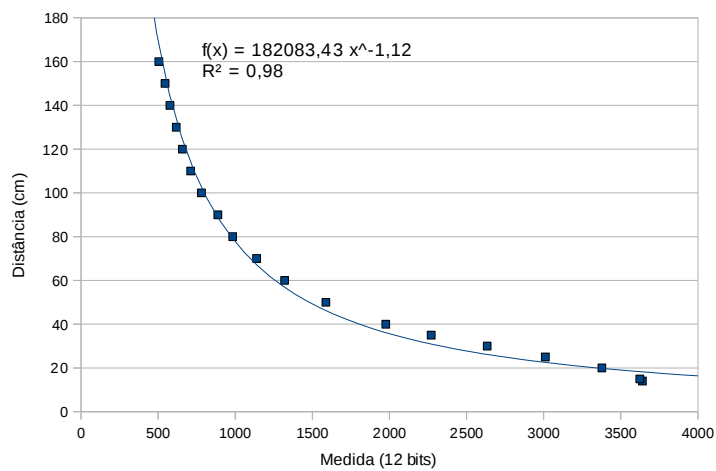
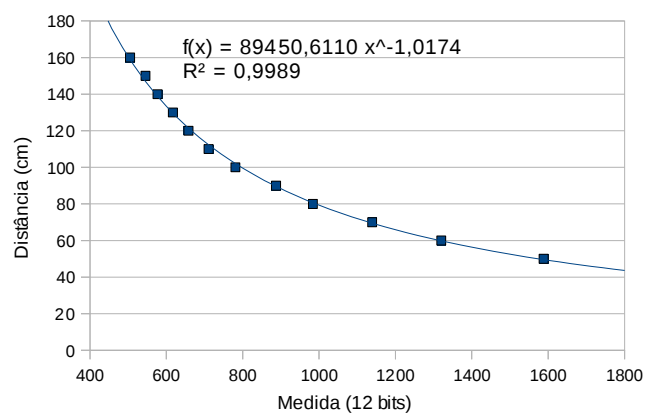
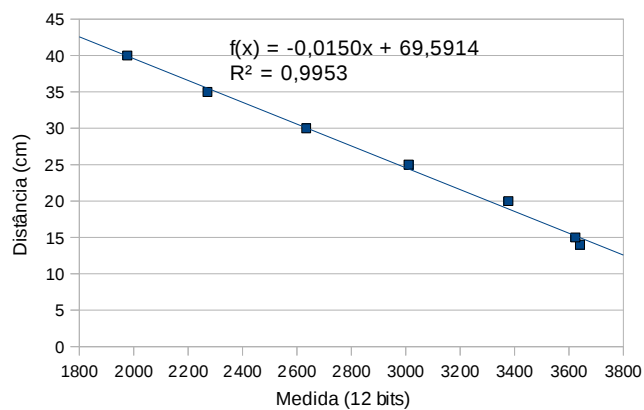


Figura 6.15: Gráfico de calibração 1



(a)



(b)

Figura 6.16: Gráficos de calibração 2

### Resultados IR *Range Finder*

Durante o desenvolvimento deste sensor, foram analisados os seus resultados em diferentes condições. As figuras 6.17 e 6.18 ilustram alguns dos resultados obtidos nos varrimentos com o sensor IR de maior alcance.

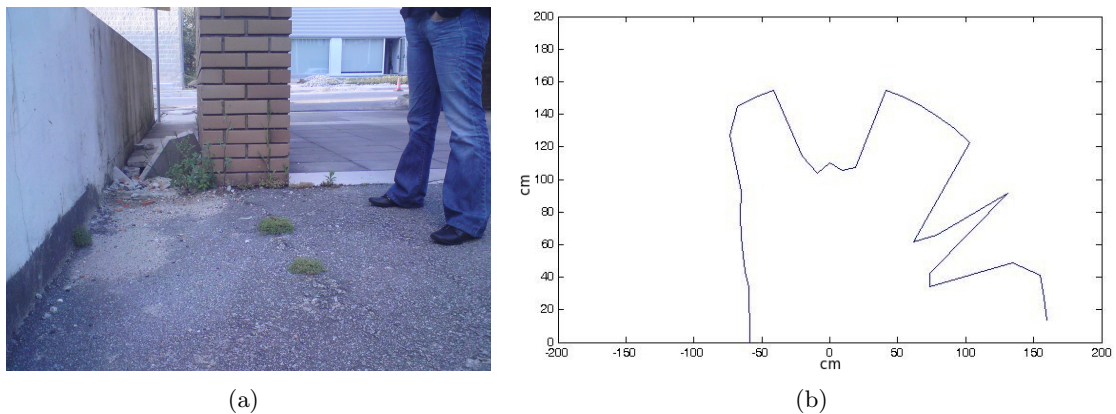


Figura 6.17: a) Cenário exterior. b) Resultado do varrimento 2D com 5° de resolução.

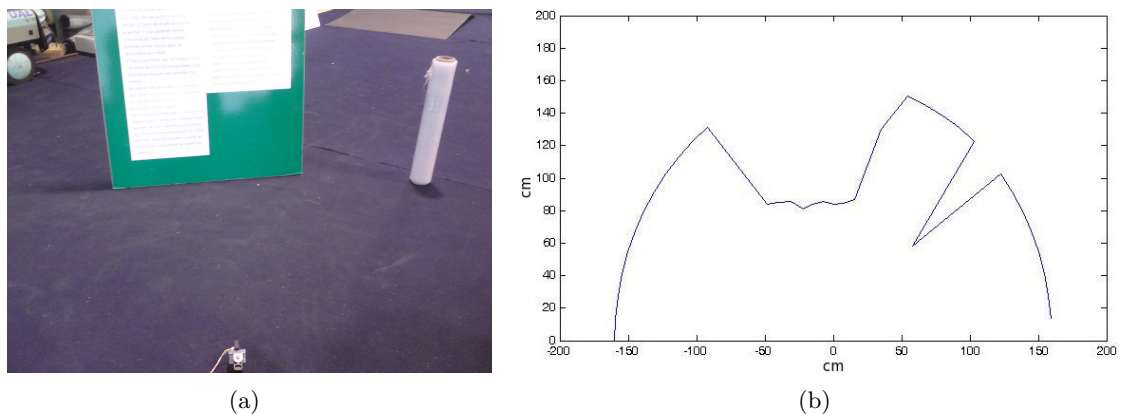


Figura 6.18: a) Cenário interior. b) Resultado do varrimento 2D com 5° de resolução.

Verificou-se que os sensores têm um bom nível de indiferença à cor dos objectos reflectidos, e boa imunidade à interferência da luz solar, quando o sensor se encontra fixo no espaço, no entanto, quando em movimento, por vezes a luz solar provoca algumas distorções nos resultados. A Figura 6.19 ilustra o resultado de um varrimento efectuado, com a distorção causada pela interferência solar visível do lado direito da imagem.

Os sensores IR têm uma taxa de saída de dados aproximada de 25 Hz, limitando assim a velocidade de rotação do IR *Range Finder*. Quanto maior a resolução desejada, maior será o tempo de rotação do sensor, contudo com uma resolução de 5°, que já disponibiliza

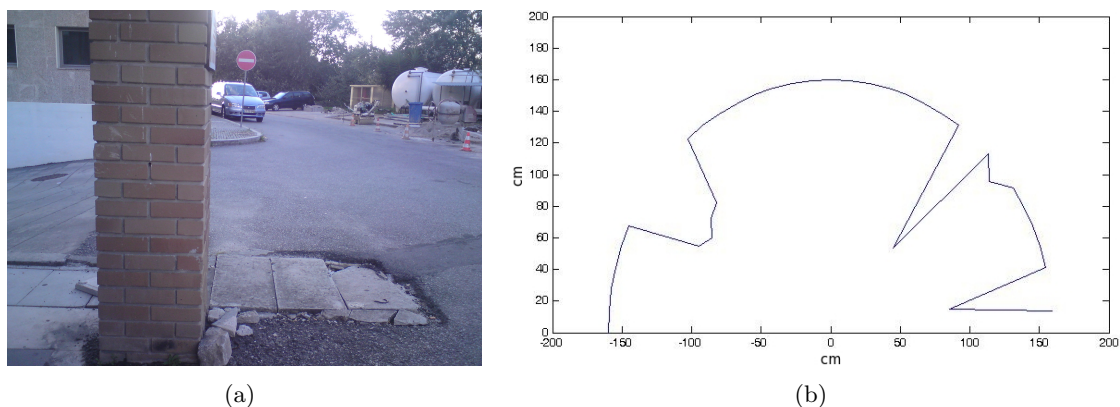


Figura 6.19: a) Cenário exterior. b) Resultado do varrimento 2D com interferência solar.

uma boa percepção da estrutura do meio, um varrimento de  $180^\circ$  é realizado em cerca de 1,5 segundos. Com a movimentação do veículo os dados do varrimento poderão ficar distorcidos, no entanto o STM32 à medida que adquire os dados de cada medida, poderá enviá-los directamente para o computador, onde cada distância detectada será associada à posição actual do veículo.

### 6.3.2 STM32

Como referido anteriormente, para realizar o interface entre alguns dispositivos e o computador da plataforma LINCE, foi necessário proceder à validação de uma placa de desenvolvimento baseada no STM32 já existente no laboratório. A validação resultou na alteração do esquema eléctrico da mesma, renovando os circuitos de alimentação e de *reset*, introduzindo um circuito de comutação para modo de programação através da porta série, e alterando o conector de JTAG incompleto.

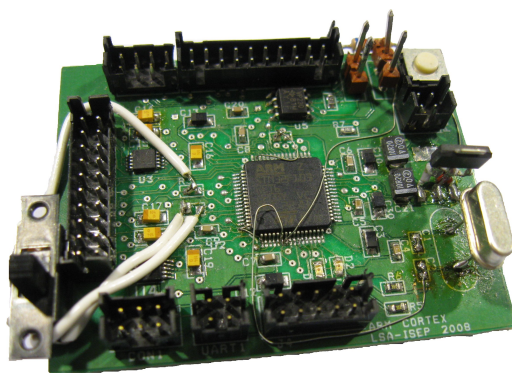


Figura 6.20: Placa de desenvolvimento validada

Com a introdução do novo microprocessador da *Connectivity line*, foi adicionado o circuito com o *transceiver* de *Ethernet*, e alterados outros circuitos para garantir a compatibilidade de todos os periféricos da placa com os dois microprocessadores. Todas as alterações realizadas levaram ao desenho de raiz de um novo *layout* de quatro camadas, ilustrado no Anexo [A.2](#).

### 6.3.3 Servo-motores Digitais

Durante o desenvolvimento das bibliotecas de controlo dos servo-motores digitais, verificou-se que o *feedback* de corrente disponibilizado pelo protocolo HMI é incompatível com a existência de mais do que um servo-motor no barramento. O protocolo não especifica qual o servo-motor a qual pede a informação, respondendo todos ao mesmo tempo.

Verificou-se também que no momento em que se requer informação dos servo-motores sobre dados de posição, tensão ou corrente, os servo-motores perdem força por um tempo muito reduzido, impossibilitando apenas a aquisição de dados a grandes frequências.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

## Capítulo 7

# Conclusão e Trabalho Futuro

Nesta dissertação apresenta-se uma solução para um sistema de busca e salvamento para actuação em diversos cenários, sendo dado ênfase aos cenários de catástrofes naturais. Com base no cenário analisado foi desenvolvida uma proposta de utilização do sistema, onde foram especificadas as funcionalidades a implementar na equipa de veículos. Definidas essas funcionalidades, foram especificados os requisitos para o hardware dos veículos terrestres.

Foi também projectada uma arquitectura conceptual do sistema de múltiplos robôs a implementar, tendo como base a utilização das plataformas LINCE desenvolvidas no LSA, em função dos requisitos das missões analisadas. Para as plataformas foram desenvolvidas soluções que respondem aos requisitos de hardware definidos, tendo em consideração a disponibilidade do hardware, as exigências de processamento que o mesmo poderia causar no sistema dos veículos, e as respectivas capacidades físicas. Foi desenhada uma arquitectura para a interligação de todo o hardware, aplicada nas plataformas.

Na implementação dessa arquitectura, foram adaptados novos actuadores e sensores, dos quais foi desenvolvido um IR *Range Finder*. Foi também desenvolvida e adaptada nos veículos uma placa de interface baseada num microprocessador STM32, que garante a interligação de alguns dos sensores, actuadores e unidades de processamento, e uma placa de distribuição e gestão de energia para todos os periféricos. Na interligação dos periféricos foram implementados protocolos de comunicação HMI e CAN-bus. Por último, e apesar de ainda não estar totalmente configurado, foi introduzido no software do veículo um gestor de missões, que possibilita uma fácil definição das missões a realizar.

A elaboração desta dissertação contribuiu para a implementação do projecto LINCE,

na medida em que foi elaborado um estudo de possíveis missões e dos requisitos das mesmas, que possibilita assim a futuros utilizadores, o acesso à informação necessária para a realização de uma determinada missão, assim como a arquitectura conceptual desenhada permitirá que o sistema realize as mesmas missões. Os veículos encontram-se também preparados para permitir a sua utilização com elevado grau de autonomia.

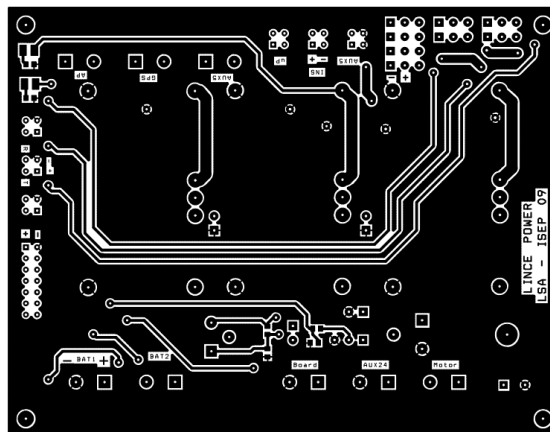
Agora que existe definida uma arquitectura para o sistema, torna-se assim possível desenvolver o software de processamento de dados dos sensores, e criar e/ou integrar algoritmos de navegação e controlo, que permitam a execução de manobras autónomas. Para a execução das missões será ainda necessário proceder à devida configuração do gestor de missões, e alterar a aplicação LINCE Mission Control, de forma a permitir a representação dos resultados dos novos sensores introduzidos. Nos veículos terão de ser integrados mecanismos adaptados a missões específicas (braços robóticos, detectores de metais, etc), dispositivos para a utilização de energias renováveis, mecanismos de auto carregamento de baterias, dispositivos de comunicação *Mesh*, e ainda proceder a alterações na plataforma mecânica que garantam a estanquidade da mesma. No que diz respeito ao sistema multi-robótico, será também necessário desenvolver a camada de supervisão responsável pela coordenação e cooperação da equipa.



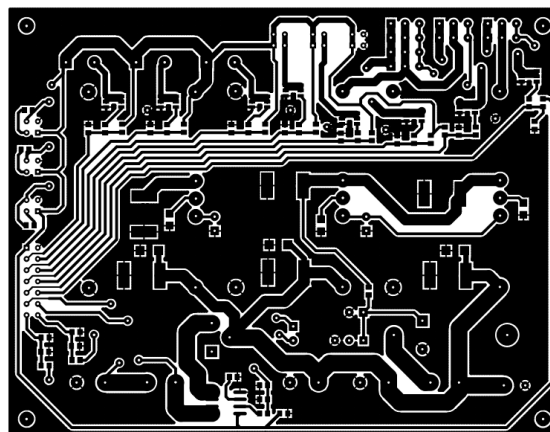
## Anexo A

# Esquemas e Layouts

### A.1 Placa de Gestão de Energia



(a)

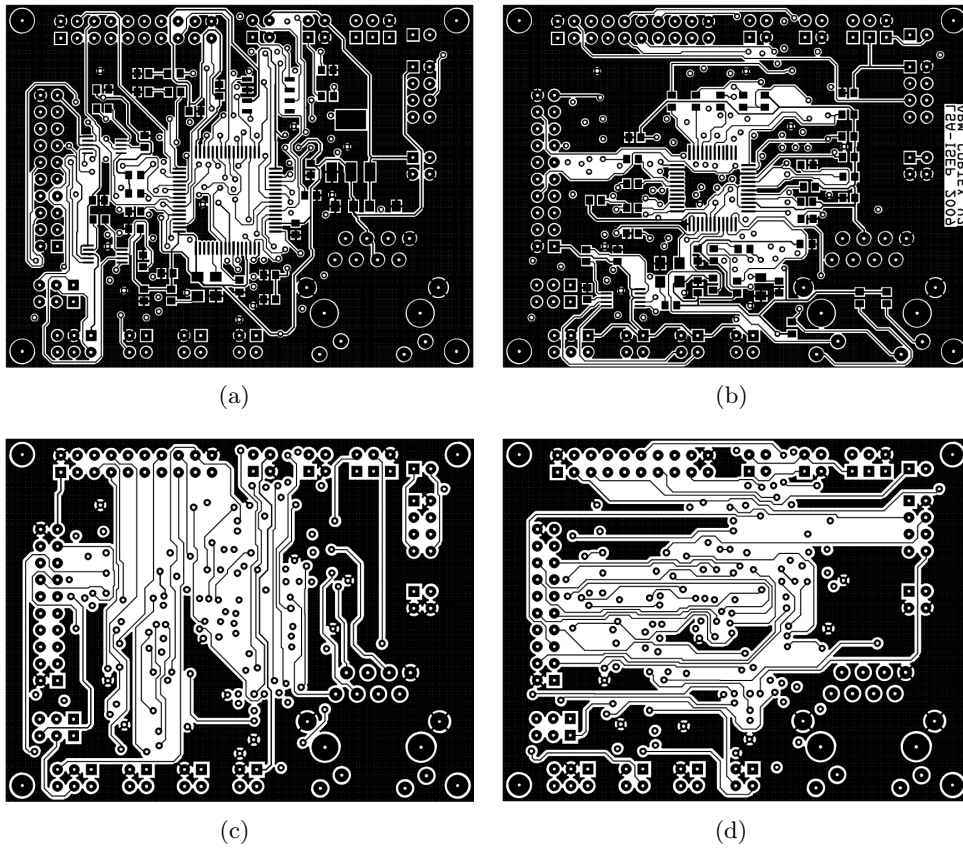


(b)

Figura A.1: *Layouts* da placa de energia



## A.2 STM32

Figura A.3: *Layouts* da placa do STM32

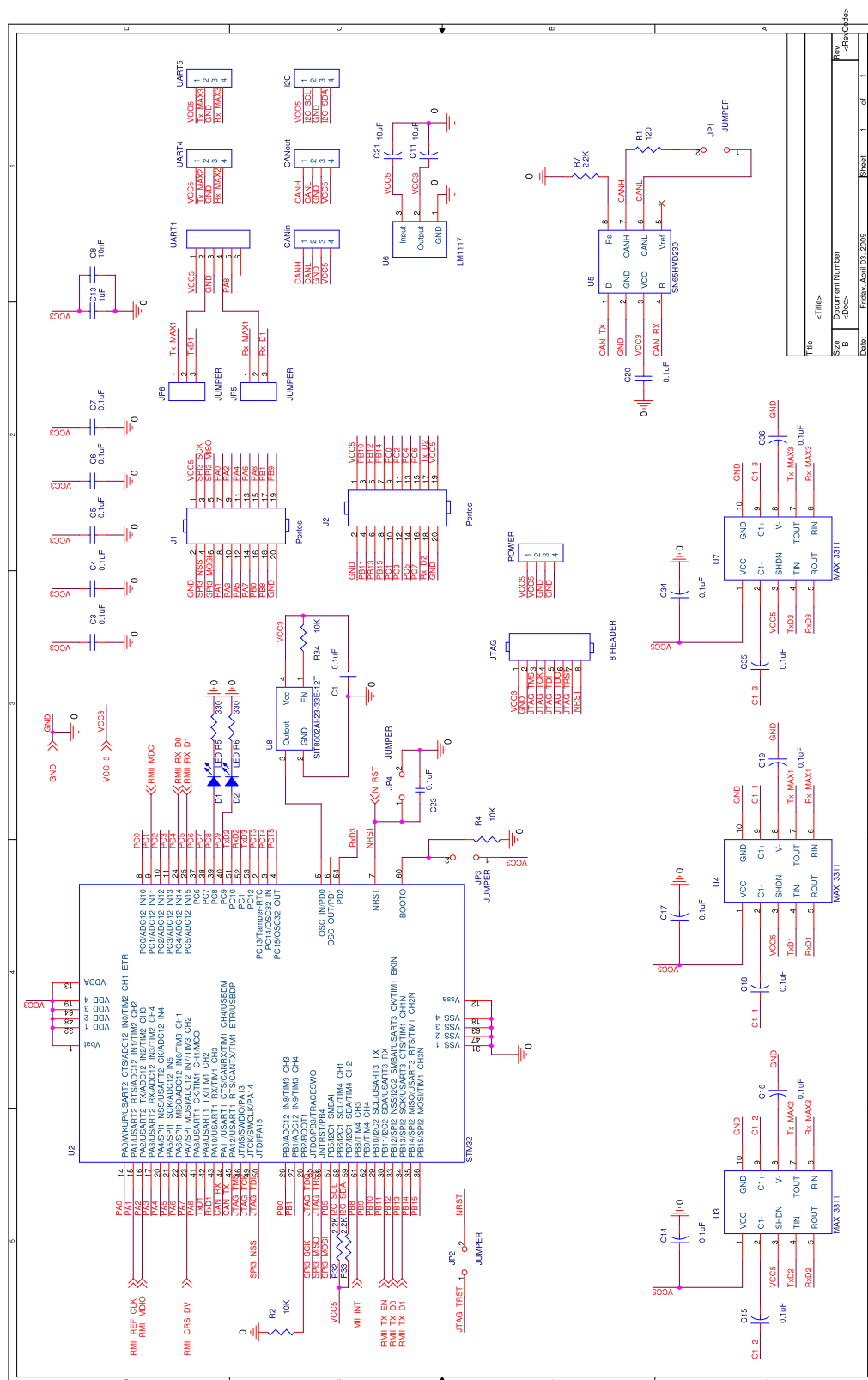
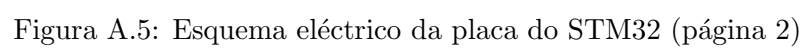


Figura A.4: Esquema eléctrico da placa do STM32 (página 1)



(Esta página foi intencionalmente deixada em branco)

# Referências

- [1] Victor Adolfsson. The state of the art in distributed mobile robotics. Master's thesis, Blekinge Institute of Technology, 2001.
- [2] Daniel Cruz, James McClintock, Brent Perteet, Omar A.A. Orqueda, Yuan Cao, and Rafael Fierro. Decentralized cooperative systems - a multivehicle platform for research in networked embedded systems. *IEEE Control Systems Magazine*, Junho 2007.
- [3] Justin Clark and Rafael Fierro. Mobile robotic sensors for perimeter detection and tracking. *ISA Transactions* 46, Fevereiro 2007.
- [4] MARS. Mars project home, Setembro 2009. <http://www.cis.upenn.edu/mars/home.html>.
- [5] R. Fierro, A. Das, J. Spletzer, Y. Hur, R. Alur, J. Esposito, G. Grudic, V. Kumar, I. Lee, J. P. Ostrowski, G. Pappas, J. Southall, and C. J. Taylor. A framework and architecture for multirobot coordination. *International Journal of Robotics Research*, 21(10-11):977–995, 2002.
- [6] J. Spletzer, A. K. Das, R. Fierro, C. J. Taylor, V. Kumar, and J. P. Ostrowski. Cooperative localization and control for multi-robot manipulation. In *Proceedings of the Conference on Intelligent Robot Systems (IROS' 01)*, Maui, Hawaii, October 29-November 3 2001.
- [7] R. Alur, A. Das, J. Esposito, R. Fierro, Y. Hur, G. Grudic, V. Kumar, I. Lee, J. P. Ostrowski, G. Pappas, J. Southall, J. Spletzer, and C. J. Taylor. A framework and architecture for multirobot coordination. In *Experimental Robotics*, Lecture Notes in Computer Science, Waikiki, Hawaii, December 10-13 2001. Springer-Verlag.
- [8] Sameer Qudsi, Kamela Watson, and April Harper. *Clodbuster Robot Building Documentation*. GRASP Laboratory, University of Pennsylvania.
- [9] K. Schilling and F. Driewer. Remote control of mobile robots for emergencies.
- [10] Daniel Eck, Manuel Stahl, and Klaus Schilling. The Small Outdoor Rover MERLIN and its Assistance System for Tele-Operations. In *6th International Conference on Field and Service Robotics - FSR 2007 Field and Service Robotics Springer Tracts in Advanced Robotics*, Chamonix France, 2007. Springer.
- [11] Joshua A. Marshall, Terence Fung, Mireille E. Broucke, Gabriele M.T. D'Eleuterio, and Bruce A. Francis. Experiments in multirobot coordination. *Robotics and Autonomous Systems* 54, 2006.

- [12] UTIAS. Marsdome project home, Setembro 2009. <http://sr.utias.utoronto.ca/marsdome.htm>.
- [13] P. Lima, M. Isabel Ribeiro, Luis Custodio, and Jose Santos-Victor. The rescue project - cooperative navigation for rescue robots. In *Proc. of ASER'03 - 1st International Workshop on Advances in Service Robotics*, Bardolino, Italy, Março 13-15 2003.
- [14] ISR. Rescue project home, Setembro 2009. <http://rescue.isr.ist.utl.pt/index.php>.
- [15] JC. Aeiou quiosque em foco - sismo na china: 71 mil mortos; 200 socorristas soterrados, Maio 2008. <http://quiosque.aeiou.pt/gen.pl?p=stories&op=view&fokey=ae.stories/9780>.
- [16] Alon Wolf, Howie Choset, Benjamin H. Brown, and Randall W. Casciola. Design and control of a mobile hyper-redundant urban search and rescue robot. *Advanced Robotics*, 19(3):221–248, 2005.
- [17] L. P. Reis. *Coordenação em sistemas multi-Agente : Aplicações na gestão universitária e futebol robótico*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [18] Patricio Nebot Roglá. *Agent-Based Architecture for Multirobot Cooperative Tasks: Design and Applications*. PhD thesis, UNIVERSITAT JAUME I, 2007.
- [19] Gustavo Pessin. *Evolução de estratégias e controle inteligente em sistemas multi-robóticos robustos*. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2008.
- [20] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga, and A. B. Kahng. Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 4:226–234, 1997.
- [21] Robert Poor and Cliff Bowman. Designing distributed sensor applications for wireless mesh networks. In S. Sitharama Iyengar and Richard R. Brooks, editors, *Distributed Sensor Networks*, pages 1049–1066. Chapman & Hall/CRC, 2005.
- [22] F. Michaud, D. Letourneau, M. Guilbert, and J.-M. Valin. Dynamic robot formations using directional visual perception. *Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference on*, 2002.
- [23] John T. Feddema, Chris Lewis, and David A. Schoenwald. Decentralized control of cooperative robotic vehicles: Theory and application. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 18, NO. 5*, October 2002.
- [24] José Almeida, Alfredo Martins, Eduardo Silva, Luís Lima, Carlos Almeida, Nuno Dias, André Dias, and Hugo Silva. Iseporto robotic soccer team for robocup 2009:improving perception. *Robocup 2009, Áustria*.
- [25] E.J.P. Earon, T.D. Barfoot, and G.M.T.D'Eleuterio. Development of a multiagent robotic system with application to space exploration. *Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference on*, July 2001.
- [26] Thomas Bräunl. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. Springer, July 2006.



- [27] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Bradford Book, 2004.
- [28] Hokuyo. Hokuyo sensors, 2009. [http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/ubg\\_04lx\\_f01.html#](http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/ubg_04lx_f01.html#).
- [29] SICK. *SICK LMS100/111/120/151 Laser Measurement Systems - Operating Instructions*. SICK AG, Germany, 2009.
- [30] Acroname. Sharp ir rangers information, 2008. <http://www.acroname.com/robotics/info/articles/sharp/sharp.html>.
- [31] José Nunes. *Gestor de Missões - Manual Técnico*. Laboratório de Sistemas Autónomos, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2006.